

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Амурский государственный университет»

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ**  
сборник учебно-методических материалов для направления подготовки:  
09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»,  
направленность (профиль) «Автоматизированные системы обработки информации и управления»

2017 г.

Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
факультета математики и информатики  
Амурского государственного  
университета

Составитель: Назаренко Н.В.

Технические средства автоматизации: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», направленность (профиль) «Автоматизированные системы обработки информации и управления» – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017 г.

© Амурский государственный университет, 2017

©Кафедра информационных и управляющих систем, 2017

© Назаренко Н.В., составление

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Краткое изложение лекционного материала	4
2. Методические рекомендации (указания) к лабораторным занятиям	69
3. Методические указания для самостоятельной работы студентов	86

# 1. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ЛЕКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

## Тема 1. Состав технических средств автоматизации

### 1.1 Классификация технических средств автоматизации

Технические средства автоматизации предназначены для создания систем, выполняющих заданные технологические операции, в которых человеку отводятся, в основном, функции контроля и управления.

По виду используемой энергии технические средства автоматизации классифицируются на электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные. Электронные средства автоматизации выделяют в отдельную группу, так как они, используя электрическую энергию, предназначены для выполнения специальных вычислительных и измерительных функций.

По функциональному назначению технические средства автоматизации можно подразделить в соответствии с типовой схемой системы автоматического регулирования на исполнительные механизмы, усилительные, корректирующие и измерительные устройства, преобразователи, вычислительные и интерфейсные устройства.

Исполнительный элемент - это устройство в системе автоматического регулирования или управления, воздействующее непосредственно или через согласующее устройство на регулируемый элемент или объект системы.

Регулирующий элемент осуществляет изменение режима функционирования управляемого объекта.

Электрический исполнительный элемент с механическим выходом - электродвигатель - применяется в качестве окончательного усилителя механической мощности. Эффект, оказываемый объектом или механической нагрузкой на исполнительный элемент, эквивалентен действию внутренних, или естественных, обратных связей. Такой подход используется в тех случаях, когда необходим детальный структурный анализ свойств и динамических особенностей исполнительных элементов с учетом действия нагрузки. Электрический исполнительный элемент с механическим выходом является составной частью автоматического привода.

Электрический привод - это электрическое исполнительное устройство, преобразующее управляющий сигнал в механическое воздействие с одновременным усилением его по мощности за счет внешнего источника энергии. Привод не имеет специального звена главной обратной связи и представляет собой совокупность усилителя мощности, электрического исполнительного элемента, механической передачи, источника питания и вспомогательных элементов, объединенных определенными функциональными связями. Выходными величинами электрического привода являются линейная или угловая скорость, тяговое усилие или вращающий момент, механическая мощность и т. д. Электрический привод должен располагать соответствующим запасом по мощности, необходимым для воздействия на управляемый объект в форсированном режиме.

Электрический сервомеханизм представляет собой следящий привод, который обрабатывает входной управляющий сигнал с усилением его по мощности. Элементы электрического сервомеханизма охватываются специальными элементами обратной связи и могут иметь внутренние обратные связи за счет нагрузки.

Механическая передача электрического привода или сервомеханизма осуществляет согласование внутреннего механического сопротивления исполнительного элемента с механической нагрузкой - регулирующим органом или объектом управления. К механическим передачам относятся различные редукторы, кривошипно-шатунные, рычажные механизмы и другие кинематические элементы, в том числе передачи с гидравлическими, пневматическими и магнитными опорами.

Электрические источники питания исполнительных элементов, устройств и сервомеханизмов подразделяются на источники с практически бесконечной мощностью, со значением их внутреннего сопротивления, близким к нулю, и источники с ограниченной мощностью

со значением внутреннего сопротивления, отличным от нуля.

Пневматические и гидравлические исполнительные устройства - это устройства, в которых в качестве энергоносителя используется соответственно газ и жидкость под определенным давлением. Эти системы занимают прочное место среди других средств автоматизации благодаря своим преимуществам, к которым, в первую очередь, относятся надежность, устойчивость к механическим и электромагнитным воздействиям, высокий коэффициент отношения развиваемой мощности приводов к собственному весу и пожаровзрывобезопасность.

Основная задача исполнительного устройства состоит в том, чтобы усилить сигнал, поступающий на его вход, до уровня мощности, достаточного для того, чтобы оказать требуемое воздействие на объект в соответствии с поставленной целью управления.

Важным фактором при выборе исполнительного элемента является обеспечение заданных показателей качества системы при имеющихся энергетических ресурсах и допустимых перегрузках.

Характеристики исполнительного устройства должны определяться из анализа автоматизируемого процесса. Такого рода характеристиками исполнительных устройств и сервомеханизмов являются энергетические, статические, динамические характеристики, а также технико-экономические и эксплуатационные характеристики.

Обязательным требованием к исполнительному приводу является минимизация мощности двигателя при обеспечении требуемых значений скоростей и моментов. Это приводит к минимизации энергетических затрат. Весьма важными факторами при выборе исполнительного устройства или сервомеханизма являются ограничения по массе, габаритным размерам и надежности.

Важными составляющими систем автоматизации являются усилительные и корректирующие устройства. Общими задачами, решаемыми корректирующими и усилительными устройствами систем автоматики, являются формирование требуемых статической и частотной характеристик, синтез обратных связей, согласование с нагрузкой, обеспечение высокой надежности и унификация устройств.

Усилительные устройства усиливают по мощности сигнал до уровня, необходимого для управления исполнительным устройством.

Особые требования, предъявляемые к корректирующим элементам систем с переменными параметрами - возможность и простота перестройки структуры, программы и параметров корректирующих элементов. Усилительные устройства должны удовлетворять определенным техническим условиям по удельной и максимальной выходной мощности.

По структуре усилительное устройство представляет собой, как правило, многокаскадный усилитель со сложными обратными связями, которые вводятся для улучшения его статических, динамических и эксплуатационных характеристик.

Усилительные устройства, применяемые в системах автоматизации, можно подразделить на две группы:

- 1) электрические усилители, имеющие электрические источники питания;
- 2) гидравлические и пневматические усилители, использующие в качестве основного энергоносителя соответственно жидкость или газ.

Источник питания или энергоноситель определяет наиболее существенные особенности усилительных устройств автоматики: статические и динамические характеристики, удельную и максимальную мощность, надежность, эксплуатационные и технико-экономические показатели.

К электрическим усилителям относятся электронные вакуумные, ионные, полупроводниковые, диэлектрические, магнитные, магнитно-полупроводниковые, электромашинные и электромеханические усилители.

Квантовые усилители и генераторы составляют особую подгруппу устройств, используемых в качестве усилителей и преобразователей слабых радиотехнических и других сигналов.

Корректирующие устройства формируют сигналы коррекции статических и динамических характеристик системы.

В зависимости от вида включения в систему линейные корректирующие устройства подразделяются на три типа: последовательные, параллельные корректирующие элементы и корректирующие обратные связи. Использование того или иного типа корректирующих устройств определяется удобством технической реализации и эксплуатационными требованиями.

Корректирующие элементы последовательного типа целесообразно применять, если сигнал, величина которого функционально связана с сигналом ошибки, является немодулированным электрическим сигналом. Синтез последовательного корректирующего устройства в процессе проектирования системы управления наиболее прост.

Корректирующие элементы параллельного типа удобно использовать при формировании сложного закона регулирования с введением интеграла и производных от сигнала ошибки.

Корректирующие обратные связи, охватывающие усилительные или исполнительные устройства, находят наиболее широкое применение благодаря простоте технической реализации. В этом случае на вход элемента обратной связи поступает сигнал сравнительно высокого уровня, например, с выходного каскада усилителя или двигателя. Использование корректирующей обратной связи позволяет уменьшать влияние нелинейностей тех устройств системы, которые ими охватываются, следовательно, в ряде случаев удастся улучшить качество процесса регулирования. Корректирующая обратная связь стабилизирует статические коэффициенты охватываемых устройств в условиях действия помех.

В системах автоматического регулирования и управления используются электрические, электромеханические, гидравлические и пневматические корректирующие элементы и устройства. Наиболее просто электрические корректирующие устройства реализуются на пассивных четырехполюсниках, которые состоят из резисторов, конденсаторов и индуктивностей. Сложные электрические корректирующие устройства включают также разделительные и согласующие электронные элементы.

В электромеханические корректирующие устройства, кроме пассивных четырехполюсников, входят тахогенераторы, импеллеры, дифференцирующие и интегрирующие гироскопы. В ряде случаев электромеханическое корректирующее устройство может быть реализовано в виде мостовой схемы, в одну из плеч которой включен электрический двигатель исполнительного устройства.

Гидравлические и пневматические корректирующие устройства могут состоять из специальных гидравлических и пневматических фильтров, включаемых в обратные связи основных элементов системы, или в виде гибких обратных связей по давлению (перепаду давлений), расходу рабочей жидкости, воздуха.

Корректирующие элементы с перестраиваемыми параметрами обеспечивают адаптивность систем. Реализация таких элементов осуществляется с помощью релейных и дискретных устройств, а также ЭВМ. Подобные элементы принято относить к логическим корректирующим элементам.

ЭВМ, функционирующая в реальном масштабе времени в замкнутом контуре управления, имеет практически неограниченные вычислительные и логические возможности. Основной функцией управляющей ЭВМ является вычисление оптимальных управлений и законов, оптимизирующих поведение системы в соответствии с тем или иным критерием качества в процессе ее нормальной эксплуатации. Высокое быстродействие управляющей ЭВМ позволяет, наряду с основной функцией, выполнять целый ряд вспомогательных задач, например, с реализацией сложного линейного или нелинейного цифрового корректирующего фильтра.

При отсутствии ЭВМ в системах наиболее целесообразно применять нелинейные корректирующие устройства как обладающие наибольшими функциональными и логическими возможностями.

Регулирующие устройства представляют собой сочетание исполнительных механизмов, усилительных и корректирующих устройств, преобразователей, а также вычислительных и интерфейсных блоков.

Информация о параметрах объекта управления и о возможных внешних воздействиях, оказывающих на него влияние, поступает на регулирующее устройство от измерительного устройства. Измерительные устройства в общем случае состоят из чувствительных элементов, воспринимающих изменения параметров, по которым производится регулирование или управление процессом, а также из дополнительных преобразователей, часто выполняющих функции усиления сигналов. Вместе с чувствительными элементами эти преобразователи предназначены для преобразования сигналов одной физической природы в другую, соответствующую виду энергии, используемой в системе автоматического регулирования или управления.

В автоматике преобразующими устройствами или преобразователями называют такие элементы, которые непосредственно не выполняют функций измерения регулируемых параметров, усиления сигналов или коррекции свойств системы в целом и не оказывают прямого воздействия на регулируемый орган или управляемый объект. Преобразующие устройства в этом смысле являются промежуточными и выполняют вспомогательные функции, связанные с эквивалентным преобразованием величины одной физической природы в форму, более удобную для формирования регулирующего воздействия или с целью согласования устройств, различающихся по виду энергии на выходе одного и входе другого устройства.

Вычислительные устройства средств автоматизации, как правило, строятся на базе микропроцессорных средств.

Микропроцессор - программно управляемое средство, осуществляющее процесс обработки цифровой информации и управления им, построенное на одной или нескольких интегральных микросхемах.

Основными техническими параметрами микропроцессоров являются разрядность, емкость адресуемой памяти, универсальность, число внутренних регистров, наличие микропрограммного управления, число уровней прерывания, тип стековой памяти и число основных регистров, а также состав программного обеспечения. По разрядности микропроцессоры подразделяются на микропроцессоры с фиксированной разрядностью и модульные микропроцессоры с изменяемой разрядностью слова.

Микропроцессорными средствами называются конструктивно и функционально законченные изделия вычислительной и управляющей техники, построенные в виде или на основе микропроцессорных интегральных микросхем, которые с точки зрения требований к испытаниям, приемке и поставке рассматриваются как единое целое и применяются при построении более сложных микропроцессорных средств или микропроцессорных систем.

Конструктивно микропроцессорные средства выполняются в виде микросхемы, одноплатного изделия, моноблока или типового комплекса, причем изделия нижнего уровня конструктивной иерархии могут использоваться в изделиях высшего уровня.

Микропроцессорные системы - это вычислительные или управляющие системы, построенные на основе микропроцессорных средств, которые могут применяться автономно или встраиваться в управляемый объект. Конструктивно микропроцессорные системы выполняются в виде микросхемы, одноплатного изделия, моноблока комплекса или нескольких изделий указанных типов, встроенных в аппаратуру управляемого объекта или выполненных автономно.

По области применения технические средства автоматизации можно подразделить на технические средства автоматизации работ на промышленных производствах и технические средства автоматизации других работ, важнейшим составляющим которых являются работы в экстремальных условиях, где присутствие человека опасно для жизни или невозможно. В последнем случае автоматизация осуществляется на базе специальных стационарных и мобильных роботов.

## **1.2 Выбор технических средств автоматизации по типу производства**

Все многообразие существующих производств можно подразделить на несколько типов. Под типом производства понимают классификационную категорию производства, выделяемую по признакам широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска продукции. В соответствии с этим различают единичное, серийное и массовое производства.

Одной из основных характеристик типа производства является коэффициент закрепления операций, определяемый отношением числа всех технологических операций, выполненных или подлежащих выполнению в течение месяца, к числу рабочих мест.

Единичное производство характеризуется малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматриваются.

Серийное производство характеризуется изготовлением или ремонтом изделий периодически повторяющимися партиями. В зависимости от количества изделий в партии или в серии различают мелкосерийное (коэффициент закрепления операций 21-40), среднесерийное (коэффициент закрепления операций 11-20) и крупносерийное (коэффициент закрепления операций 1-10) производства.

Массовое производство характеризуется большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция. Коэффициент закрепления операций для массового производства принимают равным единице.

Следует отличать тип производства от вида производства. Под видом производства понимают классификационную категорию производства, выделяемую по признаку применяемого метода изготовления изделия. Примерами видов производства являются литейное, сварочное и т. д.

Производственный процесс — это совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта продукции.

Технологический процесс - это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда. Технологический процесс может быть отнесен к изделию, его составной части или к методам обработки, формообразования и сборки. К предметам труда относятся заготовки и изделия.

Технологическая операция - это законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте.

Под изделием понимается комбинация материалов, предметов, программных и иных компонентов, готовых к использованию по назначению.

Форма организации технологических процессов изготовления изделия зависит от установленного порядка выполнения операций технологического процесса, расположения технологического оборудования, количества изделий и направления их движения в процессе изготовления. Существуют две формы организации технологических процессов: групповая и поточная.

Групповая форма организации технологических процессов характеризуется однородностью конструктивно-технологических признаков изделий, единством средств технологического оснащения одной или нескольких технологических операций и специализацией рабочих мест.

Поточная форма организации технологических процессов характеризуется специализацией каждого рабочего места на определенной операции, согласованным и ритмичным выполнением всех технологических операций на основе постоянного такта выпуска, а также размещением рабочих мест в последовательности, строго соответствующей технологическому процессу.

Массовое и крупносерийное производства предполагают применение высокопроизводительного специального основного технологического оборудования, объединенного автоматическими транспортно-загрузочными механизмами периодического действия, что в комплексе представляет собой автоматические линии. Возрастающие темпы технического прогресса требуют в массовом производстве сравнительно частого изменения конструкций и

свойств выпускаемых изделий, что вызывает необходимость в переналадке или изменении структуры автоматической линии. Таким образом, гибкость в данном случае заключается в обеспечении возможности нетрудоемкого перехода от обработки одной детали к обработке другой подобной детали.

Среднесерийное многономенклатурное производство характеризуется частой сменой выпускаемых изделий, а также небольшой длительностью выпуска деталей одного типа. Комплексная автоматизация такого производства наиболее эффективно может быть осуществлена на основе создания гибких производственных комплексов, базирующихся на методах групповой технологии.

В мелкосерийном и единичном производствах для обработки большой номенклатуры часто сменяемых деталей целесообразно использовать автономные производственные ячейки - гибкие производственные модули, позволяющие повысить рентабельность этих производств.

Таким образом, в зависимости от номенклатуры и объема выпуска изделий степень рациональности использования определенного технологического оборудования различна.

Соответствующие области применения различного оборудования в смысле гибкости и производительности в зависимости от числа деталей одного наименования, выпускаемых за год ( $N$ ), и числа разных наименований ( $M$ ) показаны на рис. 1.1.

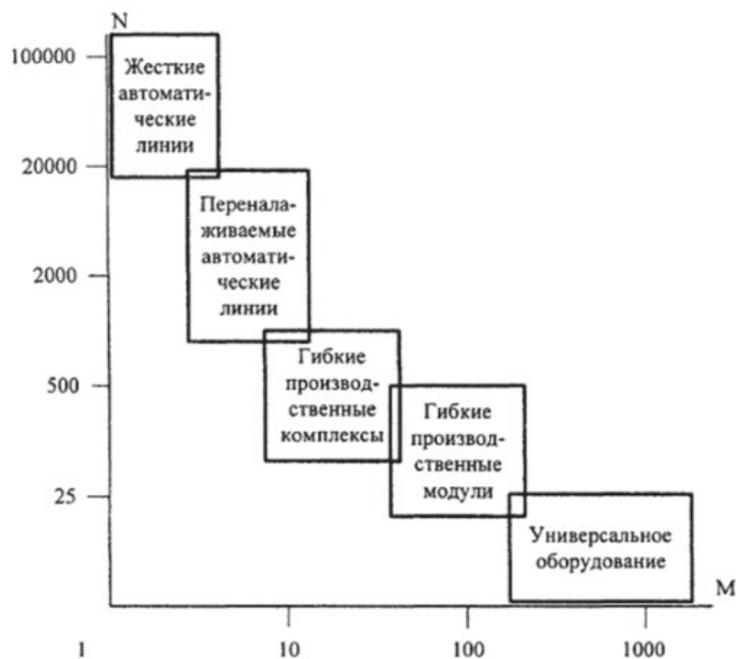


Рисунок 1.1 Области применения различного оборудования по гибкости и производительности

Использование гибких автоматизированных производств (ГАП) позволяет значительно снизить стоимость продукции в условиях среднесерийного, мелкосерийного и единичного типов производства.

### 1.3 Системы управления оборудованием

Системы управления оборудованием предназначены для организации работы отдельных типов оборудования исполнительной системы, а также для согласования их совместного функционирования.

Управление базируется на использовании модульного принципа. Основные модули представляют собой оборудование с программным управлением. Функционально модуль с программным управлением подразделяется на управляющий автомат и объект управления. В управляющий автомат загружается программа, которую он преобразует в последовательность управляющих воздействий, передаваемых по каналам связи. Объект управления, кото-

рым может быть, например, станок, обрабатывает управляющие воздействия, выполняя соответствующие рабочие операции.

Текущее состояние объекта управления характеризуется величинами сигналов обратной связи, формируемыми датчиками и подводимыми в управляющий автомат. За счет наличия обратной связи управляющий автомат может формировать или корректировать последовательность действий в соответствии с текущим состоянием объекта управления. Например, может быть разрешено выполнение очередной рабочей операции после получения сигнала с датчика о завершении предыдущей операции или выбрана соответствующая ветвь программы после поступления с датчика сигнала о необходимости изменения последовательности действий по результатам контроля объекта обработки.

Для взаимодействия с другими модулями в управляющем автомате формируется информация, отражающая такие характеристики состояния модуля, как моменты окончания отдельных фаз технологического процесса, завершение выполнения программы или наличие особых ситуаций, возникающих в процессе функционирования модуля.

Программное управление модулем обеспечивает, во-первых, его автоматическое функционирование в соответствии с заданной программой и, во-вторых, возможность изменения процесса функционирования путем загрузки в модуль другой программы, что характеризует гибкость работы модуля.

Система управления включает технические и программные средства.

Технические средства системы управления - это вычислительные машины, устройства сопряжения с объектом и устройства передачи данных. Технические средства функционируют под управлением программных средств.

Программные средства - это программы, определяющие порядок реализации функций, возложенных на систему управления. В зависимости от назначения программы эти средства делятся на обслуживающие и функциональные.

Обслуживающие программы предназначены для выполнения вспомогательных в смысле целевого назначения модуля функций, таких, как управление начальной загрузкой программ и данных в память ЭВМ, контроль работоспособности ЭВМ и других аппаратурных средств системы управления, управление обменом данными и другими модулями ГАП. Совокупность обслуживающих программ, обеспечивающих управление работой ЭВМ и реализующих вспомогательные функции по управлению модулем, является операционной системой ЭВМ.

Функциональные программы, называемые также технологическими или прикладными, предназначены для организации управления работой модуля. В них содержится информация о последовательности действий в управляемом объекте в соответствии с технологическими программами.

В процессе автоматического функционирования система управления модулем ГАП обеспечивает:

- управление порядком функционирования оборудования;
- формирование данных о нормальном или аварийном завершении операций;
- контроль за исправностью управляющих устройств и управляемого оборудования.

Комплекс самостоятельных единиц оборудования, объединенных так, чтобы было возможно их независимое или параллельное функционирование под управлением одной программы, называется ячейкой ГАП. Как правило, каждой ячейкой производства, транспортной системой и автоматическим складом управляют специальные ЭВМ. Совместное функционирование ячеек, транспорта и склада обеспечивается СУ ГАП, которая включает в себя центральную ЭВМ, управляющую ЭВМ низшего уровня иерархии, аппаратуру для связи с другими ЭВМ и оборудование операторов, контролирующих работу ГАП. Функциональная схема СУ ГАП, действующей на уровне линии, участка и цеха, представлена на рис. 1.2.

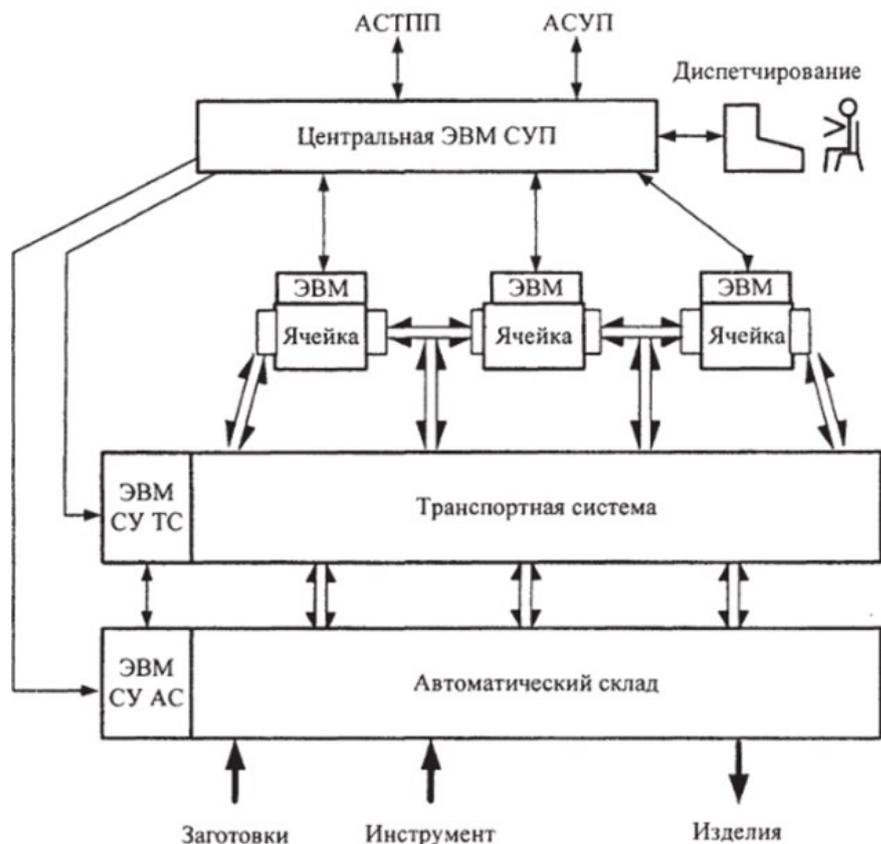


Рисунок 1 2. Функциональная схема управления линией, участком или цехом  
 СУП - система управления производством. СУ ТС - система управления транспортными средствами, СУ АС - система управления автоматическим складом  
 Здесь материальные потоки, в отличие от информационных, обозначены двойными стрелками.

Исполнительный комплекс состоит из:

- системы ячеек, объединяющей обрабатывающие, контрольно-измерительные и робототехнические модули для реализации заданной технологии;
- транспортной системы, включающей в себя автоматические транспортные средства, и программной системы управления транспортными средствами;
- автоматического склада, программно управляемого системой управления автоматическим складом.

Система управления реализует следующие основные функции:

- загрузку в ЭВМ программ, обеспечивающих функционирование компонентов исполнительной системы в соответствии с планом производства изделий;
- синхронизацию работы компонентов исполнительной системы с темпом работы оборудования согласно заданной технологии и плану производства изделий.

Загрузка управляющих программ сводится к передаче программ из памяти ЭВМ СУ ГАП в другие ЭВМ, управляющие компонентами исполнительной системы. Процедура загрузки программ представляет собой переналадку производства, которая заключается не в переналадке оборудования, а в передаче информации в ЭВМ, которые управляют оборудованием.

Синхронизация работы компонентов ГАП производится использованием соответствующих компонентов исполнительной системы по временной диаграмме функционирования ГАП и текущему состоянию каждого компонента. Управление работой компонентов и контроль их состояний осуществляются с помощью передачи сообщений между ЭВМ СУ ГАП и ЭВМ, управляющими компонентами исполнительной системы. Сообщения передаются по линиям связи, объединяющим все ЭВМ в единый управляющий комплекс.

Электронные вычислительные машины, управляющие ячейками, транспортной системой и автоматическим складом, связаны с центральной ЭВМ СУП высшего уровня, через которую они взаимодействуют и в памяти которой собираются все данные о состоянии производства. На основе этих данных программа управления, реализуемая центральной ЭВМ СУП, формирует команды, передаваемые по линиям связи в ЭВМ нижнего уровня, управляющие конкретным оборудованием. Уменьшение нагрузки на центральную ЭВМ СУП производится за счет передачи данных между ЭВМ одного уровня. Такая связь обеспечивает, например, координацию работы транспортной системы и автоматического склада.

Система управления производством может быть информационно связана с автоматизированной системой технологической подготовки производства (АСТПП) и автоматизированной системой управления производством (АСУП). С помощью АСТПП выполняется подготовка программ функционирования производства для каждого из изделий, входящих в номенклатуру. Подготовка программ заключается в разработке маршрутов движения заготовок в процессе их обработки между секциями автоматического склада и ячейками линии, участка или цеха; определении состава инструмента для каждого технического участка и составлении технологического маршрута изделия. На основе технологического маршрута разрабатываются программы управления станками, промышленными роботами, контрольно-измерительными устройствами, транспортной системой и автоматическим складом. Временная диаграмма производства изделия составляется путем определения времени операций, выполняемых ячейками ГАП, транспортными средствами и складом. Исходя из нее, формируется программа для центральной ЭВМ СУП.

С помощью АСУП осуществляются календарное и оперативное планирование производства, учет продукции и использование производственного оборудования, комплектация производства заготовками и инструментом, а также выдача информации о состоянии производства. Гибкое автоматизированное производство функционирует в соответствии с календарным планом, который составляется АСУП. Система управления производством передает в АСУП данные о ходе производства, необходимые для оперативного планирования и учета производства.

Кроме управления исполнительной системой, обеспечения взаимодействия с АСТПП и АСУП центральная ЭВМ СУП выполняет функции по обслуживанию диспетчера-оператора, контролирующего состояние производства и управляющего им в ситуациях, выходящих за рамки возможностей программ управления. В этом случае центральная ЭВМ СУП принимает команды от человека и на их основе реализует управление оборудованием. Для выполнения функций, связанных с диспетчированием, центральная ЭВМ снабжается соответствующими программами и устройствами ввода-вывода данных, обеспечивающими, например, ввод данных в ЭВМ с клавиатуры диспетчера-оператора и вывод их на дисплей и печатающее устройство.

Система управления производством является многоуровневой системой программного управления на базе ЭВМ. Принципиальная схема управления производством показана на рис. 1.3.

Исполнительная система представлена в виде совокупности модулей, выполняющих технологические и транспортные операции над материальным потоком. Через устройства сопряжения с объектами ЭВМ управляет модулями.

Первый уровень управления решает задачи управления отдельными компонентами исполнительной системы. Входящие в него ЭВМ могут взаимодействовать между собой для согласования работы соседних модулей.

Второй уровень координирует работу ЭВМ первого уровня и реализуется центральной ЭВМ системы управления линией, участком или цехом. Поскольку линии, участки и цехи материально и организационно взаимосвязаны, они также должны быть информационно взаимосвязаны путем сопряжения своих центральных ЭВМ или через ЭВМ более высокого уровня иерархии.

Третий уровень управления представляет собой ЭВМ АСТПП и ЭВМ АСУП, которые

связаны с центральной ЭВМ.

Через них можно оперативно вводить необходимую информацию в виде программ и данных по технологической подготовке производства и по его плановому управлению. ЭВМ третьего уровня в общем случае включают в себя также ЭВМ САПР.

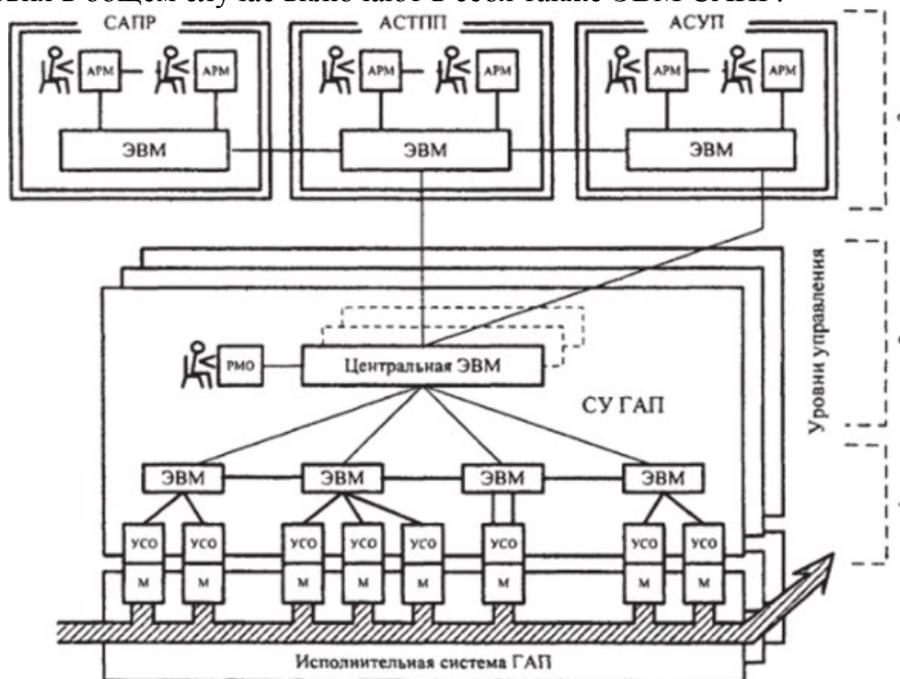


Рисунок 1.3. Уровни управления производством

АРМ - автоматизированное рабочее место; РМО - рабочее место оператора; УСО - устройство сопряжения с объектом, М - модуль исполнительной системы

Современная автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП) представляет собой многоуровневую человеко-машинную систему управления. Создание АСУ сложными технологическими процессами осуществляется с использованием автоматических информационных систем сбора данных и вычислительных комплексов, которые постоянно совершенствуются по мере эволюции технических средств и программного обеспечения.

Непрерывную во времени картину развития АСУТП можно разделить на три этапа, обусловленные появлением качественно новых научных идей и технических средств.

Первый этап отражает внедрение систем автоматического регулирования (САР). Объектами управления на этом этапе являются отдельные параметры, установки, агрегаты; решение задач стабилизации, программного управления, слежения переходит от человека к САР. Человек реализует функции расчета задания и параметров настройки регуляторов.

Второй этап - автоматизация технологических процессов. Объектом управления становится рассредоточенная в пространстве система. С помощью систем автоматического управления (САУ) реализуются все более сложные законы управления, решаются задачи оптимального и адаптивного управления, проводится идентификация объекта и состояний системы. Характерной особенностью этого этапа является внедрение систем телемеханики в управление технологическими процессами. Человек все больше отдаляется от объекта управления, между объектом и диспетчером выстраивается целый ряд измерительных систем, исполнительных механизмов, средств телемеханики, мнемосхем и других средств отображения информации (СОИ).

Третий этап - автоматизированные системы управления технологическими процессами - характеризуется внедрением в управление технологическими процессами вычислительной техники. Вначале - применение микропроцессоров, использование на отдельных фазах управления вычислительных систем. Затем активное развитие человеко-машинных систем управления, инженерной психологии, методов и моделей исследования операций и, наконец, диспетчерское управление на основе использования автоматических информационных си-

стем сбора данных и современных вычислительных комплексов.

Диспетчер в многоуровневой автоматизированной системе управления технологическими процессами получает информацию с монитора ЭВМ или с электронной системы отображения информации и воздействует на объекты, находящиеся от него на значительном расстоянии, с помощью телекоммуникационных систем, контроллеров, интеллектуальных исполнительных механизмов.

Концепция SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) - диспетчерское управление и сбор данных - позволяет достичь высокого уровня автоматизации в решении задач разработки систем управления, сбора, обработки, передачи, хранения и отображения информации.

Дружественность человеко-машинного интерфейса (HMI/MMI), предоставляемого SCADA-системами, полнота и наглядность представляемой на экране информации, удобство пользования подсказками и справочной системой повышает эффективность взаимодействия диспетчера с системой и сводит к нулю его критические ошибки при управлении. В настоящее время SCADA является основным и наиболее перспективным методом автоматизированного управления сложными динамическими системами и процессами.

Многие проекты автоматизированных систем контроля и управления (СКУ) для большого спектра областей применения позволяют выделить обобщенную схему их реализации, представленную на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 Обобщенная схема системы контроля и управления технологическими процессами

Как правило, это двухуровневые системы, так как именно на этих уровнях реализуется непосредственное управление технологическими процессами. Специфика каждой конкретной системы управления определяется используемой на каждом уровне программно-аппаратной платформой.

Нижний уровень - уровень объекта (контроллерный) - включает различные датчики для сбора информации о ходе технологического процесса, электроприводы и исполнительные механизмы для реализации регулирующих и управляющих воздействий. Датчики поставляют информацию локальным программируемым логическим контроллерам PLC (.Programming Logical Controller), которые могут выполнять следующие функции:

- сбор и обработка информации о параметрах технологического процесса;
- управление электроприводами и другими исполнительными механизмами;
- решение задач автоматического логического управления и др.

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

В качестве локальных PLC в системах контроля и управления различными технологическими процессами в настоящее время применяются контроллеры как отечественного, так и зарубежного производства. На рынке представлены десятки типов контроллеров, способных обрабатывать от нескольких до нескольких сот переменных.

К аппаратно-программным средствам контроллерного уровня управления предъявляются жесткие требования по надежности, времени реакции на исполнительные устройства, датчики и т.д. Программируемые логические контроллеры должны гарантированно откликаться на внешние события, поступающие от объекта, за время, определенное для каждого события. Для критичных с этой точки зрения объектов рекомендуется использовать контроллеры с операционными системами реального времени (ОСРВ). Контроллеры под управлением ОСРВ функционируют в режиме жесткого реального времени.

Микро-SCADA - это системы, реализующие стандартные базовые функции, присущие SCADA-системам верхнего уровня, но ориентированные на решение задач автоматизации в определенной отрасли, т.е. узкоспециализированные системы. В противоположность им SCADA-системы верхнего уровня являются универсальными.

Все компоненты системы управления объединены между собой каналами связи. Обеспечение взаимодействия SCADA-систем с локальными контроллерами, контроллерами верхнего уровня, офисными и промышленными сетями возложено на так называемое коммуникационное программное обеспечение.

Большой объем информации, непрерывно поступающий с устройств ввода-вывода систем управления, предопределяет наличие в таких системах баз данных (БД). Основная задача баз данных - своевременно обеспечить пользователя всех уровней управления требуемой информацией.

Для специалиста-разработчика системы автоматизации, так же как и для специалиста-технолога, очень важен графический пользовательский интерфейс. Функционально графические интерфейсы SCADA-систем похожи. В каждой из них существует графический объектно-ориентированный редактор с определенным набором анимационных функций. Используемая векторная графика дает возможность осуществлять широкий набор операций над выбранным объектом, а также быстро обновлять изображение на экране, используя средства анимации.

Крайне важен также вопрос о поддержке в рассматриваемых системах стандартных функций GUI (Graphic Users Interface), поскольку большинство SCADA-систем работают под управлением Windows, что и определяет тип используемого GUI.

Система является открытой, если для нее определены и описаны используемые форматы данных и процедурный интерфейс, что позволяет подключить к ней внешние независимо разработанные компоненты.

Современные SCADA-системы не ограничивают выбора аппаратуры нижнего уровня, так как предоставляют большой набор драйверов или серверов ввода-вывода и имеют хорошо развитые средства создания собственных программных модулей или драйверов новых устройств нижнего уровня. Сами драйверы разрабатываются с использованием стандартных языков программирования.

Для организации взаимодействия с контроллерами могут быть использованы следующие аппаратные средства:

- СОМ-порты. В этом случае контроллер или объединенные сетью контроллеры подключаются по протоколам RS-232, RS-422, RS-485.
- Сетевые платы. Использование такой аппаратной поддержки возможно, если соответствующие контроллеры снабжены интерфейсным выходом на Ethernet.
- Вставные платы. В этом случае протокол взаимодействия определяется платой и может быть уникальным. В настоящее время предлагаются реализации в стандартах ISA, PCI, CompactPCI.

## **Тема 2. Автоматизированные системы управления, системы автоматики и автоматического управления и их технические средства**

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

Стремительное развитие управляющей вычислительной техники во второй половине XX в. Позволило успешно осуществлять комплексную автоматизацию не только в сферах материального производства, но и

в документообороте, военном деле и сфере научных исследований. Помимо широко распространенных к тому времени таких понятий, как автоматические системы и системы автоматического управления,

появляются автоматизированные системы управления, к которым относятся автоматизированные системы управления предприятием, автоматизированные системы управления технологическими

процессами, автоматизированные системы научных исследований и ряд других систем. Характерной особенностью любых АСУ является наличие в составе таких систем человека (оператора, исследователя

или лица, принимающего решение (ЛПР)). Эта особенность отличает их от СА и САУ, которые полностью исключают участие человека в процессе управления. Вместе с тем в большинстве случаев АСУ, такие как АСУТП или АСНИ, могут содержать в своем составе различного рода СА и САУ. Поясним сказанное, дав некоторые определения и рассмотрев примеры. В любом автоматизированном комплексе можно выделить следующие основные компоненты.

1. Объект (О) автоматизации или объект управления (ОУ), который должен воспринимать и соответствующим образом реагировать на

управляющие воздействия. В качестве объектов могут выступать:

а) физические объекты:

- технические комплексы и установки с управляемым технологическим процессом,
- простые и сложные транспортные средства,
- новые материалы и образцы приборов,
- конструкции, испытываемые на прочность;

б) физические модели объектов, например аэродинамическая труба с макетом самолета;

в) математические модели, реализованные на аналоговых или цифровых электронно-вычислительных машинах (ЭВМ).

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

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

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

Автоматическое управление включает в себя две группы систем управления объектом, показанные на рис. 2.1. Это системы автоматики (СА), работающие по разомкнутому

циклу, и замкнутые системы автоматического управления (САУ), помеченные на рис. 1.1 соответственно как а и б.

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

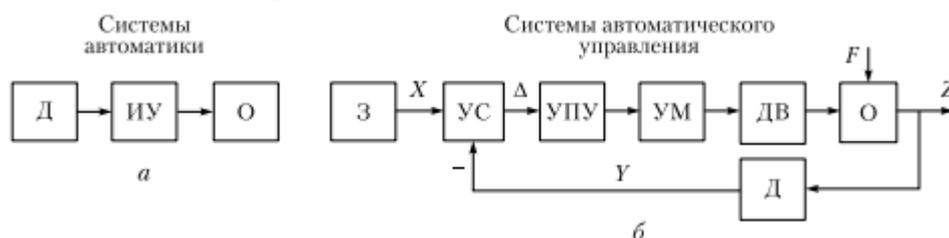


Рисунок 2.1. Две группы автоматических систем

К значительно более сложным автоматическим системам следует отнести САУ (см. рис. 2.1, б). Подобные системы во многих случаях являются так называемыми локальными автоматическими системами в составе общей АСУТП, обеспечивающей управление технологическим процессом сложного объекта. В качестве простого примера рассмотрим «технологический процесс» управления скоростью и направлением движения корабля. Оба этих параметра задают операторы (капитан и рулевой). Предположим, что эти параметры (команды) на некотором временном интервале фиксированы. Обратимся к управлению направлением движения корабля. На рис. 2.1, б представлена функциональная схема САУ, реализующая подобное управление. Сигнал управления  $X$ , задающий угол поворота руля корабля, поступает от штурвала рулевого после соответствующего преобразования в виде электрического сигнала на вход устройства сравнения (УС) САУ. Блок З на схеме — это задающее устройство (в данном примере — сам рулевой). На УС также поступает сигнал отрицательной обратной связи  $Y$  от датчика (Д) углового положения руля корабля. Если разность этих сигналов  $\Delta$ , которая в теории автоматического управления называется ошибкой, не будет равна нулю, то эта разность, пройдя усилительно-преобразовательное устройство (УПУ) и усилитель мощности (УМ), поступает на двигатель (ДВ). В качестве УПУ во многих системах используются промышленные контроллеры (ПК), которые также могут выполнять функции усилителя мощности. Двигатель через силовой редуктор будет разворачивать руль корабля (на схеме обозначен как О — объект управления) до тех пор, пока сигнал  $Y$  от датчика на руле корабля не станет равным задающему сигналу  $X$ . Это самый распространенный в САУ принцип управления «по отклонению». Достоинством такого принципа управления является то, что САУ «отрабатывает» не только сигнал управления  $X$ , но и компенсирует влияние возмущения  $F$ . В рассматриваемом примере это дополнительные механические моменты, действующие на руль корабля, связанные с подводными течениями, турбулентностью и т.д. Фактически рассматриваемая САУ является усилителем мощности. Подобные системы называют «слеящими системами», или «сервосистемами». Аналогично, укрупненно можно составить функциональную схему управления скоростью движения судна. Составляющие функциональные блоки могут быть значительно сложнее, но в контуре обязательно сохранится отрицательная обратная связь. Отметим, что СА и САУ принципиально исключают участие человека в процессе управления объектом (исключение составляет формирование сигнала уставки в САУ). Автоматизированные системы управления технологическими процессами в технических объектах строятся по функциональной схеме, показанной на рис. 2.2.

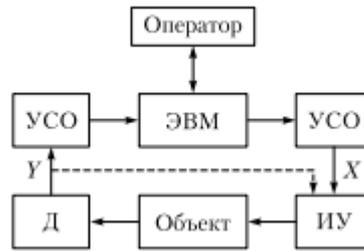


Рисунок 2.2. Функциональная схема АСУТП

На схеме следует выделить два уровня управления: нижний и верхний. Нижний уровень управления образуется самим объектом управления, датчиками (Д) состояния объекта и исполнительными устройствами (ИУ), включающими в себя требуемые усилители мощности и усилительно-преобразовательные устройства. Этот уровень управления может включать в себя СА и САУ, рассмотренные выше. На схеме пунктиром показана возможность использования сигналов датчиков  $Y$  для формирования отрицательных обратных связей САУ. Подобные локальные САУ образуют нижний уровень управления АСУТП сложными техническими объектами. Верхний уровень управления содержит управляющую ЭВМ, или программируемый логический контроллер (ПЛК) с доступом к ним оператора и устройства сопряжения с объектом (УСО). Программируемый логический контроллер по существу является управляющей ЭВМ, но, в отличие от универсальной ЭВМ, реализует определенную, ограниченную часть функций последней. Массовое производство различных ПЛК позволяет во многих случаях реализовывать более дешевые и более производительные структуры АСУТП с использованием сети ПЛК. Вместе с тем знание основных принципов построения АСУТП на базе универсальных ЭВМ позволяет грамотно и оптимально строить АСУТП с использованием ПЛК. Именно поэтому далее, в гл. 5 рассматриваются эти принципы применительно к АСУТП на базе универсальных ЭВМ, а гл. 6 целиком посвящена особенностям реализации таких принципов на ПЛК. Любая АСУТП — это совокупность технических и программных средств для: управления объектом автоматизации, измерения его параметров, обработки хранения и отображения информации. Для нее характерны задачи измерения параметров объекта автоматизации в реальном времени и управления объектом в соответствии с сигналами, поступающими с датчиков объекта.

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

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

Отметим, что ПЛК, как управляющие ЭВМ, уже снабжены УСО в виде точек входа/выхода, к которым непосредственно подключаются датчики и маломощные ИУ. Для передачи информации часто используются пакетные (Ethernet) технологии передачи данных по локальной компьютерной сети. При управлении ИУ большой мощности к выходам ПЛК подключаются УПУ или УМ. Аппаратные средства УСО на входе, как правило, только преобразуют входные аналоговые сигналы в цифровой код и посылают его в компьютер. Эти функции УСО могут выполнять самостоятельно некоторые виды датчиков со встроенными микропроцессорами. Отдельно эти виды датчиков в учебнике не рассматриваются. Задача вычисления исходных значений входных сигналов оставляется прикладному ПО, которое находится в компьютере.

Программное обеспечение ЭВМ (ПЛК) должно содержать:

- 1) программы для управления аппаратными средствами УСО, называемые драйверами устройств;
  - 2) прикладное ПО, которое выполняет различные виды обработки сигналов.
- Драйверы включают набор команд управления УСО и уникальны для каждого типа

устройств. Они решают следующие задачи:

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

Устройства сопряжения с объектом с помощью драйверов управляют объектом автоматизации, измеряют сигналы датчиков и в ряде случаев отображают данные. Прикладное ПО обеспечивает выработку и посылку команд драйверам, получение ответа о результате их выполнения, анализ, обработку и отображение получаемых данных. Роль прикладного ПО играет пользовательское приложение, которое решает перечисленные задачи. При использовании универсальной ЭВМ для построения АСУТП пользователи не ограничены типами устройств, которыми можно управлять. В этом случае можно сочетать и согласовывать между собой устройства различных категорий, такие как: внутримашинные, последовательные интерфейсы, унифицированные интерфейсные шины (например, КАМАК1), параллельные порты и др. Будем далее условно относить к системам автоматизированного управления предприятием (АСУП) такие, которые не содержат двусторонних средств непосредственной связи с объектом автоматизации. В зависимости от наличия или отсутствия односторонних связей АСУП с объектом возможны три варианта систем: 1) АСУП, не содержащие средств непосредственного сопряжения с объектом ни по входам, ни по выходам. Они предназначены для обработки информации вне реального времени. Параметры объекта оператор может вводить в систему вручную, а результаты обработки информации использовать для ручного управления объектом; При управлении ИУ большой мощности к выходам ПЛК подключаются УПУ или УМ. Аппаратные средства УСО на входе, как правило, только преобразуют входные аналоговые сигналы в цифровой код и посылают его в компьютер. Эти функции УСО могут выполнять самостоятельно некоторые виды датчиков со встроенными микропроцессорами. Отдельно эти виды датчиков в учебнике не рассматриваются. Задача вычисления исходных значений входных сигналов оставляется прикладному ПО, которое находится в компьютере.

Программное обеспечение ЭВМ (ПЛК) должно содержать:

1) программы для управления аппаратными средствами УСО, называемые драйверами устройств;

2) прикладное ПО, которое выполняет различные виды обработки сигналов. Драйверы включают набор команд управления УСО и уникальны для каждого типа устройств.

Они решают следующие задачи:

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

Устройства сопряжения с объектом с помощью драйверов управляют объектом автоматизации, измеряют сигналы датчиков и в ряде случаев отображают данные. Прикладное ПО обеспечивает выработку и посылку команд драйверам, получение ответа о результате их выполнения, анализ, обработку и отображение получаемых данных. Роль прикладного ПО играет пользовательское приложение, которое решает перечисленные задачи. При использовании универсальной ЭВМ для построения АСУТП пользователи не ограничены типами устройств, которыми можно управлять. В этом случае можно сочетать и согласовывать между собой устройства различных категорий, такие как: внутримашинные, последовательные интерфейсы, унифицированные интерфейсные шины (например, КАМАК1), параллельные порты и др. Будем далее условно относить к системам автоматизированного управления

предприятием (АСУП) такие, которые не содержат двусторонних средств непосредственной связи с объектом автоматизации. В зависимости от наличия или отсутствия односторонних связей АСУП с объектом возможны три варианта систем: 1) АСУП, не содержащие средств непосредственного сопряжения с объектом ни по входам, ни по выходам. Они предназначены для обработки информации вне реального времени. Параметры объекта оператор может вводить в систему вручную, а результаты обработки информации использовать для ручного управления объектом;

## **2.2 Основные принципы построения автоматизированной системы управления производством**

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

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

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

Средства отображения данных и непосредственного вмешательства в работу АСУТП имеются в составе ЭВМ.

2. Иерархический принцип построения АСУТП. В соответствии с этим принципом, АСУТП на верхнем уровне управления могут строиться из отдельных подсистем АСУТП, которые, в свою очередь, функционально делятся на два уровня — объектно-ориентированный (нижний) и инструментальный (верхний). Объектно-ориентированные подсистемы нижнего уровня, как правило, располагаются вблизи от объекта автоматизации и предназначены для решения следующих задач:

- измерения параметров объекта в реальном времени;
- управления объектом;
- сбора данных измерений;
- оперативной обработки данных, временного хранения, представления данных оператору и пересылки их в АСУ инструментального уровня.

В состав объектно-ориентированных подсистем нижнего уровня могут входить СА и САУ. Инструментальные подсистемы верхнего уровня, которые можно отнести к SCADA-системам (могут находиться вдали от объекта автоматизации) предназначены для решения задач:

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

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

3. Модульный принцип построения аппаратных средств АСУТП. Этот принцип предусматривает использование отдельных законченных модулей фиксированного назначения в качестве элементов АСУТП. Под модулем в АСУТП подразумевается отдельное устройство. В случае построения АСУТП на базе универсальной ЭВМ к модулям можно отнести аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП), таймеры и т.д.

Кроме того, в общем случае к ним же относятся ПЛК, УПУ, УМ, устройства связи и т.п., из которых система собирается, как «из кубиков» внутри шкафа автоматики. Такой подход обеспечивает легкую и быструю замену вышедшего из строя модуля системы на аналогичный, а также упрощает модернизацию системы.

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

5. Принцип магистральной организации системы в основном доминирует в АСУТП. Он предусматривает наличие общей системы шин — магистрали, к которой подключаются отдельные функциональные элементы АСУ, в том числе ЭВМ. Магистральный принцип обеспечивает одинаковую доступность модулей для центрального элемента системы, т.е. ЭВМ. В системе с общей магистралью обращение к тому или иному модулю осуществляется путем его адресации, точно так же, как это делается в ЭВМ при обращении к ячейке ОЗУ. Наличие общей магистрали упрощает подключение новых модулей в систему и тем самым возможность расширения и гибкость АСУТП. Вместе с тем широкое распространение разнообразных по возможностям и стоимости ПЛК во многих архитектурных построениях АСУТП позволяет отойти от принципа общей магистрали, поскольку в одной АСУТП может оказаться несколько совместно работающих ПЛК, каждый из которых выполняет свои функции управления на своем уровне. При этом эффективность работы таких АСУТП порой возрастает по сравнению с системами с одним центральным процессором.

6. Принцип унификации аппаратных и программных средств позволяет:

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

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

### **2.3 Особенности практического построения автоматизированных систем**

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

В зависимости от сложности ТОУ разрабатываемые АСУТП могут базироваться на одной управляющей ЭВМ (ПЛК), как показано на рис. 2.2, либо на комплексе ПЛК, реализующих ряд автономных АСУТП с единым программным обеспечением в виде SCADA-системы. Обобщенная функциональная схема такой АСУ, включающая уровень АСУП, показана на рис. 2.3. В подобной системе предполагается совместное использование SCADA и ERP-систем для одновременной работы АСУП и АСУТП. Взаимодействие этих двух систем на уровне предприятия позволяет уточнить и конкретизировать критерий управления АСУТП как соотношение, характеризующее качество функционирования ТОУ в целом и конкретные числовые значения отдельных показателей в зависимости от используемых управляющих воздействий. Критериями управления могут быть:



Рисунок 2.3 Обобщенная функциональная схема АСУ

- технико-экономический показатель (себестоимость, производительность ТООУ и т.п.);

- технический показатель (параметр процесса, характеристики выходного продукта).

Система управления ТООУ является АСУТП в том случае, если она осуществляет управление ТООУ в целом в темпе протекания ТП и если в выработке и реализации решений по управлению участвуют средства ВТ и другие технические средства и человек-оператор. Функции АСУТП в целом — это совокупность действий отдельных подсистем АСУТП, реализованных на ПЛК, направленных на достижение частных целей управления каждой из этих подсистем. Функции подсистем АСУТП при этом подразделяются:

- на управляющие, результатом которых являются выработка и реализация управляющих воздействий на ТООУ (регулирование или стабилизация отдельных технологических переменных, однотактное логическое управление операциями или аппаратами, программное логическое управление группой оборудования, оптимальное управление установившимися или переходными технологическими режимами, адаптивное управление объектом в целом);

- информационные, содержанием которых являются сбор, обработка и предоставление информации о состоянии автоматизированного технологического комплекса (АТК) оперативному персоналу или передача этой информации для последующей обработки. Сюда входят централизованный контроль и измерение технологических параметров, косвенное измерение параметров процесса, формирование и выдача данных оперативному персоналу АТК, подготовка и передача информации в смежные системы управления, обобщенная оценка и прогноз состояния АТК и его оборудования. Отличительная особенность управляющих и информационных функций АСУТП — их направленность на конкретного потребителя (ТООУ, оперативный персонал, смежные системы управления);

- вспомогательные — это функции, обеспечивающие решение внутрисистемных задач. Они имеют потребителя вне системы. Это контроль функционирования и состояния технических средств, контроль над хранением информации и т.п.

Состав АСУТП:

- техническое обеспечение (вычислительные и управляющие устройства, средства получения (датчики), преобразования, хранения, отображения и регистрации информации, устройства передачи сигналов и исполнительные устройства);

- программное обеспечение — совокупность программ, необходимая для реализации функций АСУТП, заданного функционирования комплекса технических средств (КТС) и предполагаемого развития системы;

- информационное обеспечение, включающее информацию, характеризующую состояние АТК, системы классификации и кодирования технологической и технико-

экономической информации, массива данных и документов, необходимых для выполнения всех функций АСУТП, в том числе нормативно-справочную информацию; • организационное обеспечение — совокупность описаний функциональной, технической и организационных структур, инструкции для оперативного персонала, обеспечивающих задание функционирования его в составе АТК; • оперативный персонал; • технологи-операторы, осуществляющие контроль над управлением ТОУ с использованием рекомендаций выработанных АСУТП; • эксплуатационный персонал АСУТП. Ремонтный персонал в состав АСУТП не входит.

### 2.3.2. SCADA-система в структуре автоматизированной системы управления

В соответствии с приведенным определением SCADA-система, показанная на рис. 2.3, входит в состав верхнего уровня АСУТП, и ее структура зависит от сложности выполняемой АСУТП задачи. На рис. 3.4 представлена общая структура технического обеспечения системы SCADA. Рассмотрим каждый компонент этой общей схемы SCADA-системы.

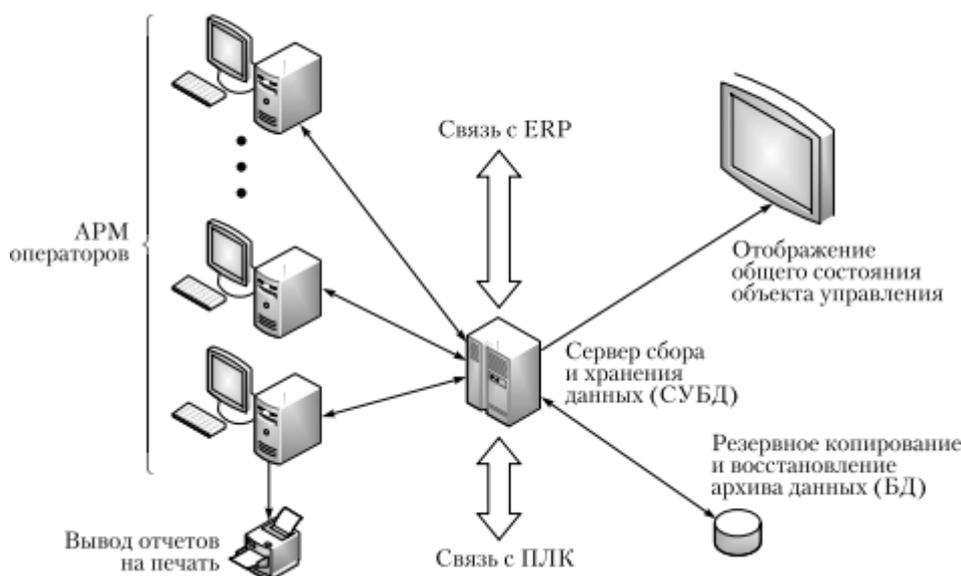


Рисунок 2.4. Структура технического обеспечения системы SCADA

Автоматические рабочие места (АРМ) операторов служат для отображения информации о части системы, за которую отвечает оператор, и принятия управляющих команд от оператора. Передают принятые команды серверу для занесения в архив и последующей передачи программируемым контроллерам. Как показано на рис. 2.4, обычно в качестве АРМ выступают ЭВМ. На данный момент здесь все чаще применяются обычные персональные компьютеры, но могут также использоваться специализированные ЭВМ. Программное обеспечение этих ЭВМ должно обеспечивать НМІ, т.е. осуществлять связь оператора с объектом управления. Интерфейс принятия команд здесь чаще всего реализован с помощью клавиатуры и мыши, но иногда — посредством сенсорного управления. Вывод отчетов на печать — там, где это необходимо, АРМ должны предусматривать возможность вывода отчетов, например при организации отдельных АРМ для экспертного (статистического) анализа системы. В случае отсутствия прямой связи с ERP или отсутствия ERP как такового также необходимо АРМ для создания и печати различных отчетов (от ежедневных до годовых). Отображение общего состояния объекта управления может быть необходимо для корректной оценки текущей ситуации операторами. Здесь применяются различные реализации:

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

Сервер сбора и хранения данных осуществляет сбор данных от ПЛК и их запись в ар-

хив. Обычно архив реализован средствами СУБД (система управления базами данных). Связь с ПЛК может осуществляться как по стандартным для ПК интерфейсам (Ethernet, RS232), так с помощью специализированных плат расширения или внешних устройств (FER — Front End Processor). Связь с ERP обычно осуществляется средствами локальной сети, в отдельных случаях могут использоваться глобальные сети. Резервное копирование и восстановление архива данных необходимо для обеспечения надежности хранения информации. Может быть реализовано различными способами, как на внешние носители, так и на другие жесткие диски сервера. Резервирование. Необходимо отметить, что в системе может требоваться горячее резервирование ее компонент. Обычно оно начинается с сервера СУБД, но может затрагивать все компоненты системы. При построении верхнего уровня АСУТП могут быть задействованы не все компоненты, приведенные на рис. 1.4. В самом простом случае может быть задействован только один ПК, тогда он будет выполнять одновременно роль сервера и АРМ. SCADA-система предоставляет программное обеспечение для создания и функционирования АРМ, связи с СУБД, создания отчетов и отображения общего состояния объекта управления. По сути, для отображения общего состояния используются те же средства, что и для АРМ, только здесь отображается система в целом и отсутствуют функции управления. Детализация уровня ПЛК АСУТП зависит от сложности выполняемых задач. Рассмотрим общую схему одного сегмента сети на базе ПЛК, реализующего подсистему АСУТП, показанную на рис. 2.5.

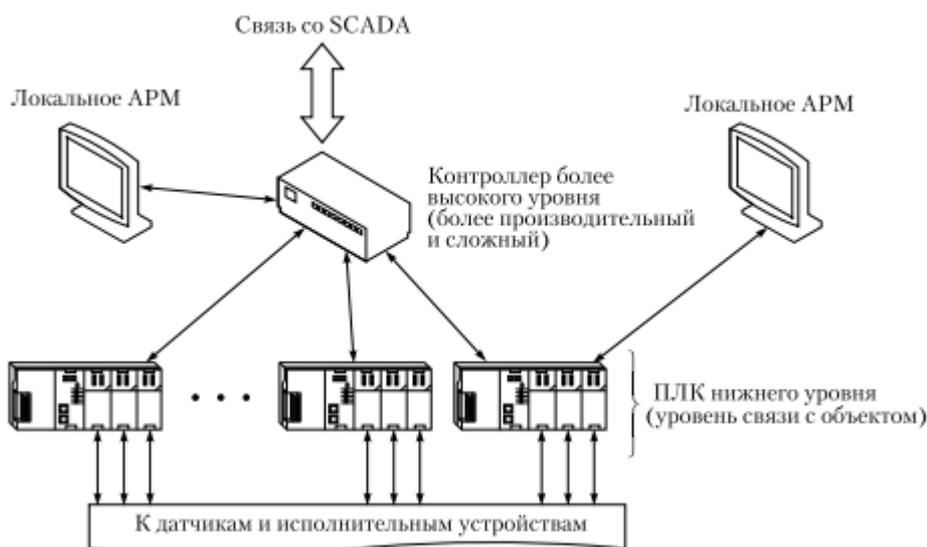


Рисунок 2.5. Общая схема сегмента сети ПЛК

Изучим каждый указанный на схеме сегмента компонент более подробно. Программируемый логический контроллер нижнего уровня непосредственно подключается к датчикам и исполнительным устройствам. Подключение может быть осуществлено как напрямую, так и через связующие или преобразующие устройства. Например, для управления частотой вращения мощных электродвигателей необходимо использовать дополнительные схемы усилителей мощности, поскольку выходы контроллера могут быть не рассчитаны на требуемую мощность управления.

Другой пример, когда датчики выдают электрический сигнал в диапазоне токов, отличном от диапазона работы входов контроллера, и требуется устройство преобразования. Иногда связующие устройства просто обеспечивают защиту входов/выходов контроллера от нештатных токов и напряжений. На нижнем уровне обычно используются простые и дешевые контроллеры, целью которых является получение информации от датчиков, преобразование ее в вид, удобный для передачи по цифровому каналу, и обеспечение этой передачи. Для таких контроллеров часто применяется термин RTU — Remote Terminal Unit (удаленный терминал). В настоящее время многие датчики уже снабжены этими функциями и готовы пе-

редавать результаты измерения по цифровым каналам, используя стандартные протоколы (например, Modbus). Это достигается за счет использования в этих датчиках микропроцессоров, а сами датчики так и называют — «микропроцессорные».

В связи с этим все чаще в АСУТП на этом уровне контроллеры замещаются микропроцессорными датчиками. Контроллер более высокого уровня собирает и обрабатывает информацию от контроллеров более низкого уровня. Информация после обработки передается на верхний уровень. Здесь важно отметить, что на верхний уровень передается уже не вся полученная информация, а только необходимая. Например, может осуществляться передача по изменению показаний датчиков и (или) с определенной периодичностью и т.д. Именно в этом заключается функция обработки информации. Также данный контроллер передает управляющие команды от верхнего уровня, но может сам автоматически вырабатывать управляющие команды, если это предусмотрено в его программе. Например, он может осуществлять автоматическое управление согласно типовым законам регулирования: пропорциональному (П), интегральному (И), пропорционально-интегральному (ПИ), пропорционально-дифференциальному (ПД), пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) или автоматически осуществлять аварийные остановки/отключение оборудования. Локальные АРМ предназначены для непосредственного управления каким-либо локальным объектом. Обычно они играют роль локального пульта управления. Чаще всего их изготавливают в виде пультов с ламповой или светодиодной индикацией и кнопочным управлением. Но они могут быть представлены и обычными ПК или ПК с сенсорным интерфейсом в пыле-, влагозащищенном корпусе. Особенность этих АРМ в том, что они получают информацию непосредственно с ПЛК, а не из архива, расположенного на сервере. Однако все команды управления с этих АРМ также должны фиксироваться в архиве на верхнем уровне. На рис. 1.5 представлен сегмент сети ПЛК. Вся сеть целиком может быть более сложной, и вид ее зависит от объекта автоматизации. Сами сегменты могут иметь и более сложную структуру, например, уровней иерархии ПЛК может быть больше двух. Однако следует отметить, что обычно используются простые решения: информация с датчиков (в том числе и с микропроцессорных датчиков) собирается и обрабатывается одним ПЛК и далее передается серверу для занесения в архив.

### *2.3.3. ERP-системы в составе автоматизированной системы управления предприятием*

Как отмечалось выше, структура АСУП совместно со SCADA-системой обеспечивает управление документооборотом предприятия. Для ее функционирования чаще всего используется ПО в виде систем ERP. «ERP — Enterprise Resource Planning» — планирование ресурсов предприятия, специализированный пакет ПО, ориентированный на организацию управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами.

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

- Oracle – американская корпорация, крупнейший в мире разработчик ПО для организаций;
- SAP — немецкая компания, известный производитель ПО. В 2000-е гг. появилось значительное количество ERP-систем для малого и среднего бизнеса, наиболее известными поставщиками которых стали:
  - Sage Group — британская компания, разработчик программных решений в области управления предприятиями;
  - Microsoft. Модульный принцип организации позволяет внедрять ERP-системы поэтапно, вводя в эксплуатацию один или несколько функциональных модулей на каждом этапе, а также выбирать потребителю только те из модулей, которые актуальны для него.

Допускается также использование модулей из разных ERP-систем. Примером отечественных разработок в этой области могут служить программные продукты компании Adastra, модульный пакет для ERP, выпускаемый под торговой маркой T-FACTORY.exe™, и SCADA-система, выпускаемая под торговой маркой TRACE MODE®. Уровень технического

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

#### 2.3.4. Особенности построения автоматизированной системы научных исследований

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

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

Иными словами, характер экспериментов видоизменяется, объем исследований растет, сложность экспериментальных задач, как правило, увеличивается. Перечисленные особенности научных экспериментов приводят к тому, что практически всегда в ходе эксплуатации АСНИ возникают потребности в изменении некоторых ее характеристик с учетом полученной уже информации о свойствах объекта. При этом используется уникальная исследовательская аппаратура, время создания которой значительно, может устареть в ходе проведения исследований. Перечисленные особенности позволяют сформулировать основное требование к АСНИ — гибкость системы. Указанное требование означает: 1) система должна допускать простую замену одних элементов другими с требуемыми техническими характеристиками или новым функциональным назначением; 2) система должна иметь возможность расширения, т.е. простого добавления недостающих технических средств к уже имеющимся и включения их в систему; 3) система должна иметь возможность гибкой перестройки алгоритмов и методики экспериментальных исследований. При выполнении указанных требований стоимость системы должна оставаться в приемлемых пределах. Указанные требования к АСНИ не противоречат требованиям, предъявляемым к АСУТП.

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

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

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

Второй этап следует отнести к началу 1930-х гг., когда в промышленность и военное дело стали внедряться САУ. К этому времени в теории автоматического управления были получены фундаментальные результаты, позволившие синтезировать устойчивые САУ с требуемыми точностными характеристиками и качеством переходных процессов. В это время в САУ стали использовать электромеханические сравнивающие устройства на сельсинах или потенциометрах, электромашинные усилители мощности (ЭМУ) и исполнительные двигатели постоянного тока. В дальнейшем с развитием магнитной техники и электроники ЭМУ были вытеснены магнитными усилителями, ламповыми, а затем полупроводниковыми. Стали более совершенными измерители рассогласования, и в качестве исполнительных двигателей появились двухфазные асинхронные и шаговые двигатели.

Третий этап приблизительно относится к середине 1970-х гг., когда развитие микросхемотехники привело к созданию больших интегральных схем. Это обеспечило резкое уменьшение габаритов и увеличило производительность ЭВМ. В результате появляются управляющие ЭВМ и контроллеры, которые позволяют создавать современные АСУ. Про-

гресс в совершенствовании больших и малых контроллеров для разных целей не прекращается и в нынешнее время. Применение контроллеров в сочетании с силовыми IGBT транзисторами позволило, например, в 1990-е гг. создать частотные преобразователи (инверторы) для эффективного управления мощными трехфазными синхронными и асинхронными двигателями. Эти двигатели повсеместно вытесняют из состава САУ менее надежные и дорогостоящие двигатели постоянного тока. На всех этапах непрерывно продолжают совершенствоваться хорошо известные типы датчиков, и одновременно с появлением новых материалов появляются новые их типы. Как правило, физические явления, используемые в датчиках для преобразования неэлектрических величин в электрические, оказываются давно известными. Однако датчики на их основе для практического применения долгое время не удается создать в силу ряда причин (низкая чувствительность, габариты, диапазон измеряемой величины, стабильность показаний и т.д.). Например, эффект Холла наблюдается во многих материалах, но промышленные датчики на основе этого явления стали создаваться с появлением полупроводниковых материалов. Это же относится к новым типам датчиков для измерения температуры, фотоприемникам и пр.

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

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

#### **2.4. Принципы подбора технических средств проектируемой системы в соответствии с техническим заданием**

##### *2.4.1. Разработка технического задания на проектируемую систему*

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

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

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

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

- 1) параметры нагрузки (момент инерции и внешние механические моменты на валу нагрузки);
- 2) требования на режимы работы вала нагрузки;

- 3) ошибки (погрешности) при обработке типовых воздействий;
- 4) качество переходных процессов;
- 5) требования к исполнительному двигателю;
- 6) дополнительные условия (условия эксплуатации системы, источник питающего напряжения, вес, габариты, конструкция силового редуктора и т.д.).

Анализ представленных требований уже на стадии формирования ТЗ позволяет ограничить круг допускаемых к применению в проектируемой системе типов элементов, таких как исполнительные двигатели, устройства измерения сигнала рассогласования, датчики угловой скорости и т.д. В самом деле, при наличии питающей сети 36 В, частотой 400 Гц и относительно невысокой требуемой выходной мощности системы целесообразно предварительно выбрать в качестве исполнительного двигателя двухфазный асинхронный. Аналогичные рассуждения можно провести и для устройств измерения рассогласования и других устройств проектируемой системы. Естественно, что в процессе проектирования предварительные наметки по выбору конкретных типов технических устройств могут быть пересмотрены (по согласованию с заказчиком системы). В любом случае следует понимать, что заказчик всегда стремится минимизировать стоимость проектируемой системы при безусловном обеспечении всех закладываемых в ТЗ требований по ее техническим характеристикам.

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

### **Тема 3. Технические средства автоматизации промышленных производств**

#### **Станки и системы ЧПУ**

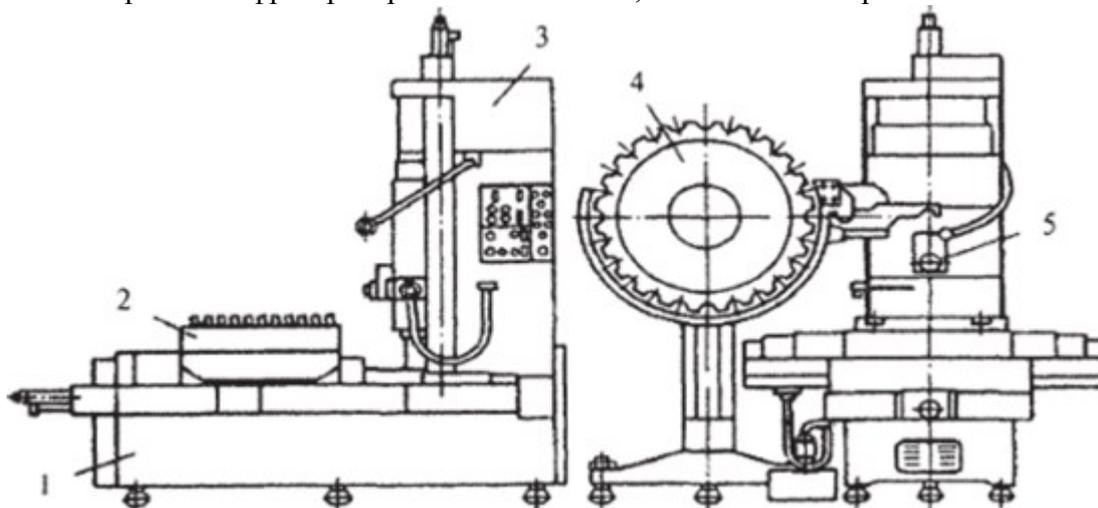
Промышленная технологическая система имеет следующий состав технических средств: оборудование для изготовления заготовок, станки токарной группы, обрабатывающие центры, системы числового программного управления (ЧПУ) и промышленные роботы (ПР).

*Оборудование для изготовления заготовок* используется в технологии изготовления изделия, от заготовок до получения готовой детали. Типовыми операциями при изготовлении заготовок корпусных деталей, в частности корпусных деталей для ЭВМ, является горячая штамповка, радиальная и торцевая раскатка, литье. Одним из наиболее прогрессивных видов формообразования в производстве заготовок корпусных деталей из цветных сплавов является литье под давлением. В автоматизированный комплекс литья под давлением входят машина литья под давлением, раздаточная электропечь, робот для заливки расплавленного металла, устройство смазки пресс-форм, робот для извлечения отливки из пресс-формы, резервуар для охлаждения отливки и пресс для обрубки литников и облоя.

*Станки токарной группы* подразделяются в зависимости от вида крепления заготовки на патронные, центровые и комбинированные патронно-центровые. Для малых производственных площадей целесообразно использование патронных станков с ЧПУ вертикального исполнения. Широко распространен серийный станок с двумя четырехпозиционными суппортами с независимыми перемещениями. Удобство загрузки и установки детали в патрон, постоянство ориентации детали при транспортировании и обработке обуславливают простоту автоматизации этих операций и встраивание станков указанной модели в гибкие автоматизированные комплексы.

Патронно-центровые станки эффективно используются на опытных производствах с часто меняющейся номенклатурой изделий. Применение патронно-центровых станков несколько увеличивает производственные площади, но повышает универсальность из-за возможности обработки широкой номенклатуры деталей.

*Обрабатывающие центры* являются станками сверлильно- фрезерно-расточной группы для обработки корпусных и плоскостных деталей. Они обладают возможностью автоматизации смены инструмента и деталей, а также осуществления автоматического контроля обрабатываемых деталей. Примером обрабатывающего центра является многоцелевой горизонтальный сверлильно-фрезерно-расточный станок, показанный на рис. 3.1.



**3.1 Многоцелевой горизонтальный сверлильно-фрезерно-расточный станок:**

1 - основание; 2 - стол; 3 - шпиндельная бабка; 4 - инструментальный магазин; 5 - шпиндель

Этот станок предназначен для комплексной обработки корпусных деталей средних размеров с четырех сторон без переустановки. Размеры деталей ограничены рабочей поверхностью стола. На станке можно производить фрезерование плоскостей, пазов и криволинейных поверхностей концевыми, торцевыми и дисковыми фрезами, а также выполнять операции растачивания, сверления, зенкерования и нарезания резьбы метчиками.

автоматической установки инструмента по углу и получения возможности нарезания резьбы резцом станок оснащен устройством для контроля угла поворота. Расширение технологических возможностей станка достигается за счет поворотного стола, точность которого позволяет обрабатывать соосные отверстия консольным инструментом. Устройство для автоматической смены инструмента содержит инструментальный магазин на несколько десятков позиций. Важной характеристикой станка является минимальное время разгона и торможения привода подачи, находящееся в пределах 0,2 с. Это обеспечивает высокую производительность станка.

Системы ЧПУ позволяют осуществлять выполнение технологической операции по заранее определенной программе, заданной в цифровой форме.

*Системой ЧПУ* называется совокупность функционально взаимосвязанных и взаимодействующих технических и программных средств, обеспечивающих числовое программное управление объектом управления, например станком.

Общая структура системы ЧПУ приведена на рис. 3.2.

Устройством ЧПУ называется устройство, выдающее управляющие сигналы на исполнительные органы станка в соответствии с управляющей программой и информацией о состоянии управляемого объекта. Под управляющей программой (УП) понимается совокупность команд на языке наограммирования, соответствующая заданному алгоритму функционирования станка по обработке конкретной заготовки. Описание управляющей программы обработки может быть представлено последовательностью отдельных кадров программы. Каждый кадр имеет адресную структуру с последовательностью команд и записывается с помощью алфавитно-цифровых символов. Цифровая информация дает при этом количественную характеристику описания.

Устройства ЧПУ выпускаются в виде номенклатурнопараметрических рядов, характеризующихся числом каналов управления приводами, типом управляемых приводов переме-

щений и используемых в них датчиков, объемом информации обмена со станком и конструктивным исполнением.

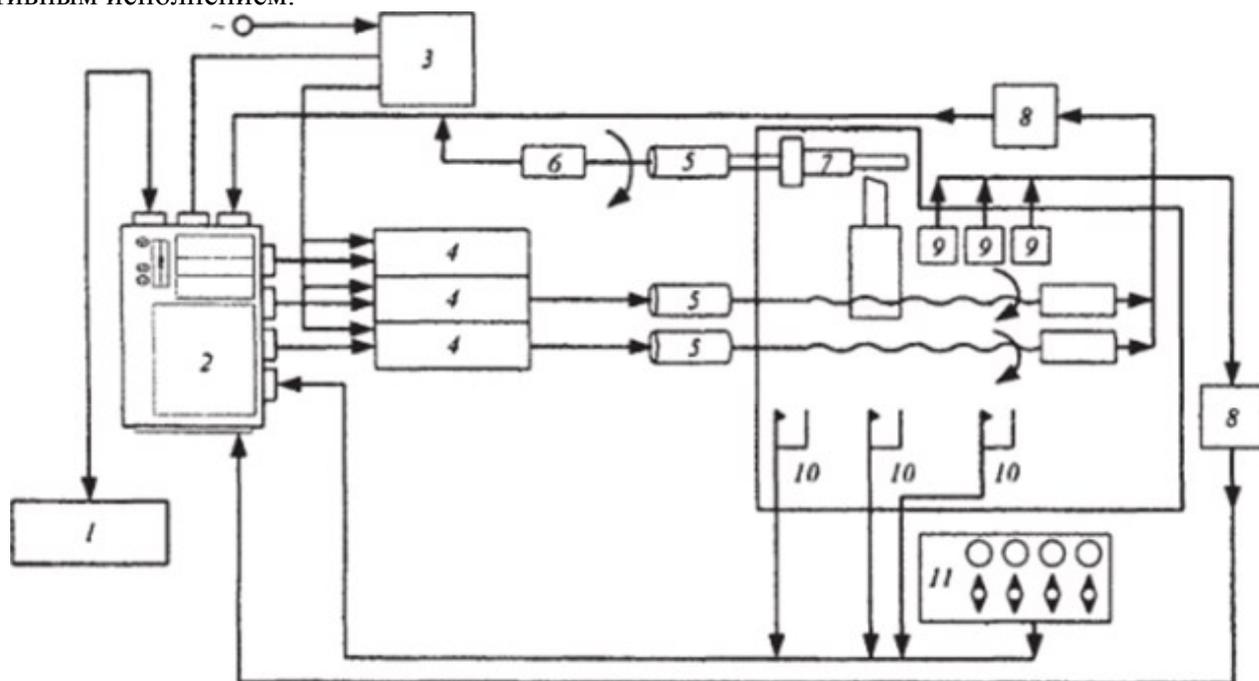


Рисунок. 3.2. Общая структура системы ЧПУ:

1 - аппаратура связи с ЭВМ верхнего ранга, периферийные устройства ввода - вывода данных; 2 - устройство ЧПУ; 3 - станция питания и другие вспомогательные узлы; 4 - блок управления двигателями подачи; 5 - двигатели приводов подачи и привода главного движения; 6 - измерительные преобразователи перемещений рабочих органов станка; 7 - кинематическая система станка; 8 - нормирующие и согласующие блоки измерительных каналов; 9 - измерительные датчики параметров технологического процесса; 10 - сигнальные датчики фиксированных положений рабочих органов; 11 - рабочие органы пульта управления станка

Унификация системы ЧПУ для разных технологических объектов экономически эффективна. Системы, обеспечивающие управление широким классом объектов, называются многоцелевыми. Перенастройка многоцелевых систем ЧПУ для нового объекта управления, в частности для нового станка, обеспечивается изменением алгоритмов функционирования.

Совокупность программ, отражающих алгоритмы функционирования объекта управления, называется *системным программным обеспечением*. Системное программное обеспечение остается неизменным для данного объекта управления в отличие от управляющей программы, которая изменяется при изготовлении разных деталей на одном и том же объекте.

Существует несколько поколений систем ЧПУ. Системы первого поколения наиболее просты. К ним относятся системы ЧПУ, работавшие от магнитной ленты по управляющей программе. Для этих систем характерно промежуточное преобразование закодированной управляющей программы в виде числовых массивов на перфоленте в непрерывную программу на магнитной ленте. Это преобразование выполняется на специальном централизованном интерполяторе, который не совмещен со станком. Система управления станка воспроизводит только запись с магнитной ленты. Отсюда следует основной недостаток таких систем, заключающийся в невозможности коррекции управляющей программы непосредственно у станка, а также удлиненный цикл технологической подготовки производства, обусловленный наличием дополнительного программносителя в виде магнитной ленты.

Ко второму поколению относятся системы со структурой NC (*Numerical Control*). Название структуры образовано из первых букв английского эквивалента выражения "числовое управление". Эта система обеспечивает работу станка от управляющей программы, закодированной на восьмидорожечной перфоленте. Характерной чертой структур типа Л/С является аппаратная реализация функциональных узлов системы, приводящая к низкому уровню унификации и соответственно к большому разнообразию типов устройств ЧПУ. Отсут-

ствие при этом оперативной памяти обуславливает жесткость алгоритмов функционирования, а необходимость обращения к программноносителю на перфоленте в каждом кадре уменьшает надежность системы.

В третьем поколении систем ЧПУ была повышена унификация и гибкость за счет использования структур типа *CNC* (*Computer Numerical Control*), что означает "числовое управление на основе

ЭВМ". Эта структура соответствует многоцелевым перепрограммируемым системам ЧПУ, которые приспособливают управляющую ЭВМ для решения задач систем ЧПУ. В качестве программируемого преобразователя здесь выступает процессор, включающий в себя арифметико-логическое устройство и устройство управления.

Хранение информации осуществляется в оперативном запоминающем устройстве, постоянном запоминающем устройстве и полу- постоянном запоминающем устройстве, а также во внешних устройствах. Управление технологическим процессом осуществляется по меткам реального времени, которые формируются таймером. Связь между блоками системы и технологическим объектом организуется через интерфейсные шины, а связь с внешними устройствами - через контроллер обмена. Согласование управления процессами во всех блоках реализуется устройством управления. Обмен информацией с технологическим объектом производится через шины местного интерфейса. Типичными узлами связи с технологическим оборудованием являются многоканальные аналого-цифровые преобразователи, цифро-аналоговые преобразователи, а также узлы приема и вывода цифровых сигналов в виде кодов.

Высокий уровень унификации систем типа *CNC* достигается за счет использования таких свойств управляющей вычислительной техники, как программируемость и агрегируемость. *Программируемость* позволяет редактировать управляющую программу у станка и без конструктивных вмешательств изменять алгоритмы функционирования системы. *Агрегируемость* позволяет использовать эти системы для управления самым различным оборудованием, что характеризует их как многоцелевые.

Еще большее развитие функциональных возможностей проявляется в системах ЧПУ типа *DNC* (*Direct Numerical Control*), что означает "прямое числовое управление". С помощью этих систем можно управлять напрямую от ЭВМ целой группой станков. В памяти ЭВМ находятся управляющие программы деталей, изготавливаемых на этих станках. Однако одноуровневые системы типа *DNC* не являются эффективными из-за возможности сбоя работы всех станков при отказе ЭВМ. Оптимальными в смысле эффективности являются двухуровневые системы типа *DNC* с ЭВМ на верхнем уровне и с системами ЧПУ типа *CNC* на нижнем. Каждым технологическим объектом управляет собственная система типа *CNC*, а работу всех систем организует одна ЭВМ.

Принципиальным отличием систем *DNC* является отсутствие перфоленты в системах ЧПУ нижнего уровня, что позволяет передавать управляющие программы по линиям связи между верхним и нижним уровнями без участия человека. Таким образом, системы ЧПУ типа *DNC* в наибольшей степени удовлетворяют следующим требованиям, предъявляемым к системам управления в условиях гибких автоматизированных производств:

- возможность программирования без конструктивных изменений различных законов управления с хранением системного программного обеспечения в оперативной памяти;
- энергонезависимость, обеспечивающая хранение системного программного обеспечения и накопленных необходимых массивов информации;
- помехоустойчивость, позволяющая управлять технологическим оборудованием, вызывающим высокий уровень помех;
- многокоординатное и многопараметрическое управление при возможности агрегирования средств сопряжения;
- обеспечение требуемой производительности и точности управления, а также достаточного ресурса памяти.

Основные задачи систем ЧПУ в условиях гибкого автоматизированного производства

можно сформулировать следующим образом:

1. Ввод и хранение системного программного обеспечения и управляющей программы. Ввод информации может производиться по каналу связи с ЭВМ верхнего уровня.

2. Реализация циклов - выделение повторяющихся участков программы для ее сокращения. Фиксированные циклы характерны для определенных технологических операций, встречающихся при изготовлении многих изделий, например при сверлении. Программные технологические циклы соответствуют повторяющимся участкам данного изделия.

3. Интерпретация кадра - проведение предварительных процедур для обработки очередного кадра программы с целью обеспечения непрерывности управления.

4. Интерполяция - получение с требуемой точностью координат промежуточных точек траектории движения по координатам крайних точек и заданной функции интерполяции.

5. Управление приводами подач - организация цифровых позиционных следящих систем для каждой координаты движения. На вход системы управления приводами поступают коды, зависящие от результатов интерполяции. Этим кодам соответствует определенное перемещение по координате.

6. Коррекция на размеры инструментов - смещение координат при коррекции управляющей программы на длину инструмента или формирование эквидистантных траекторий при учете фактического радиуса инструмента.

7. Логическое управление - управление технологическими узлами дискретного действия, входные сигналы которых производят релейные операции.

8. Смена инструмента - поиск гнезда магазина с требуемым инструментом и замена отработавшего инструмента на новый.

9. Адаптивное управление - организация обратной связи с помощью датчиков непосредственно от изготавливаемого изделия для повышения качества его обработки.

10. Автоматический встроенный контроль - установка датчиков контроля в зоне обработки изделия.

Приведенный перечень задач может быть дополнен задачами обмена информацией с сопрягаемыми устройствами.

Все задачи определяют необходимость развития многоцелевых систем ЧПУ, обладающих свойствами унификации и гибкости. Основным способом реализации задач является программный, при котором решаемой задаче ставится в соответствие не конструктивный, а программный модуль, являющийся частью системного программного обеспечения и хранящийся в памяти.

Смена инструмента может реализовываться по схеме, представленной на рис. 3.3.

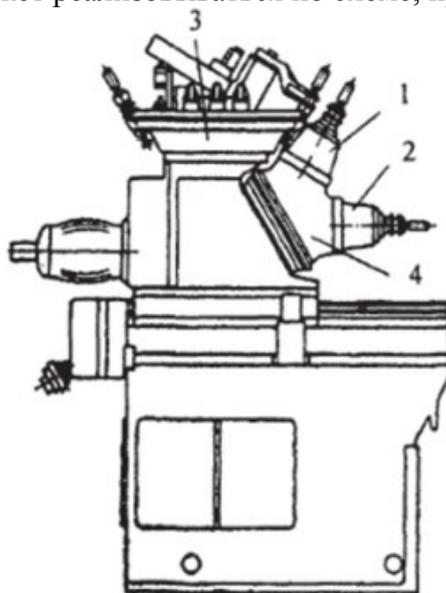


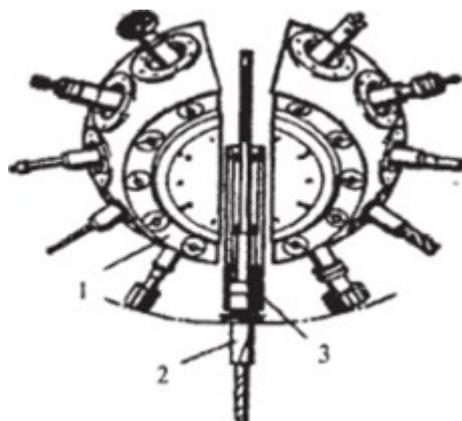
Рисунок 3.3. Схема смены инструмента:

1 - магазин, 2 - инструментальная оправка, 3 - ось шпинделя станка, 4 - барабан

Магазин расположен на корпусе шпиндельной бабки так, что при транспортировании инструментальной оправки в зону перегрузки ее ось совмещается с осью шпинделя станка. При перемещении шпиндельной каретки оправка захватывается и зажимается в шпинделе. При дальнейшем движении шпинделя вдоль оси оправка освобождается из захватов магазина, после чего включается привод шпинделя и выполняется операция обработки заготовки.

Время смены инструмента в механизмах таких конструкций складывается из времени поиска заданного инструмента, захвата шпинделем и выталкивания из магазина инструментальной оправки и ее установки в магазин после выполнения операции обработки детали.

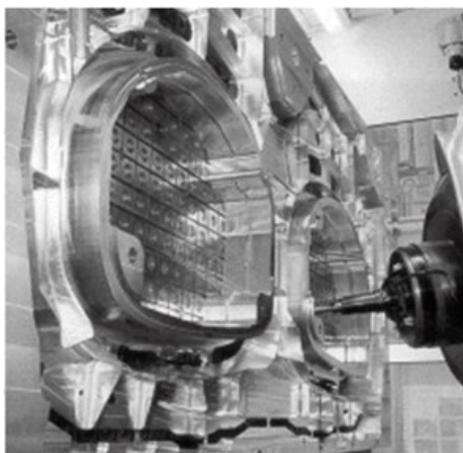
Для сокращения времени смены инструмента используют двухшпиндельную поворотную головку (рис. 3.4).



*Рисунок 3.4 Двухшпиндельная поворотная головка:  
1 - барабан, 2 - инструмент, 3 - магазин*

Загрузка инструмента из магазина осуществляется, в то время как шпинделем производится обработка детали. Затем барабан поворачивается, и шпиндели меняются местами. Время смены инструмента определяется временем поворота барабана на  $180^\circ$  и его зажима.

Для обработки крупногабаритных изделий используют схему с закрепленным объектом обработки и подвижным инструментом. Пример обработки корпусных деталей по такой схеме приведен на рис. 3.5.



*Рисунок 3.5. Пример обработки крупногабаритного изделия*

Организация встроенного автоматического контроля ускоряет переход на так называемую "безлюдную технологию". Контроль в зоне обработки позволяет без участия оператора решать задачи базирования, коррекции на размеры инструмента и технической диагностики. Расширение сети датчиков обратной связи от объекта позволит более гибко управлять технологическим процессом. Перспективной является также организация коррекции погрешностей механических узлов оборудования по таблицам, хранящимся в памяти системы ЧПУ. Формирование таблиц может быть автоматизировано за счет средств встроенного контроля.

Безотказность систем ЧПУ можно повысить как общим улучшением качества средств автоматизации, так и совершенствованием организации систем. Иерархические системы производят обмен информацией между уровнями через унифицированные системы сопряжения -

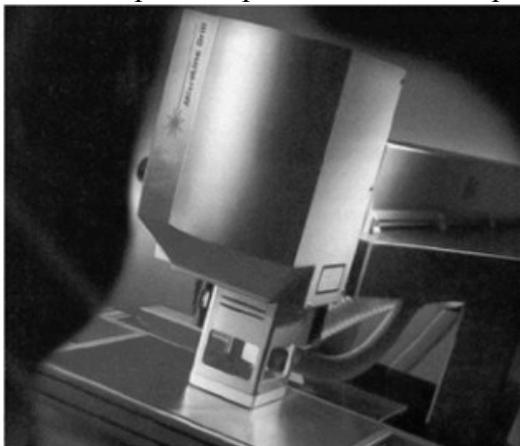
## *интерфейсы*

В соответствии с формой передачи данных интерфейсы подразделяют на параллельные, последовательно-параллельные и последовательные. При передаче данных параллельным или последовательнопараллельным способами сигналы в приемное устройство поступают не одновременно, что обусловлено разбросом параметров шин сопряжения и формирующих схем. Это может привести к ошибкам в считывании информации, поэтому предпочтение отдают последовательным интерфейсам, так как исключается указанный недостаток. Однако они характеризуются меньшей скоростью обмена.

Большое значение имеет эффективность каналов и линий связи между терминальными системами ЧПУ и ЭВМ верхнего уровня. Перспективным является применение оптических линий связи, обладающих высокой помехоустойчивостью.

В последнее время в области ЧПУ произошли изменения, затрагивающие функциональные возможности, аппаратную платформу и системные средства, архитектуру и состав прикладного математического обеспечения. Доминирующие позиции заняла концепция открытых систем ЧПУ - PCNC (*Personal Computer Numerical Control*), построенных на базе персонального компьютера.

Пример PCNC станка для лазерной обработки деталей приведен на рисунок. 3.6.



*Рисунок 3.6. PCNC - станок для лазерной обработки деталей*

Гибкие и сложные системы ЧПУ с открытой архитектурой выполняют согласно двухкомпьютерной архитектурной модели. По мере роста вычислительной мощности компьютеров все более используемым становится однокомпьютерный вариант.

*Двухкомпьютерная модель* предполагает размещение PC-подсистемы на одном компьютере, а NC-подсистемы - на другом. В PC-подсистеме наиболее целесообразна операционная система Windows NT, а в NC-подсистеме - операционная система реального времени UNIX. Обе операционные системы совместимы в том смысле, что поддерживают коммуникационные протоколы TCP/IP, и это позволяет построить коммуникационную среду, объединяющую подсистемы. Включение в эту среду прикладного уровня с многочисленными функциями доступа к интерфейсам модулей создает виртуальную шину, оказывающую услуги доступа на низком уровне. Объектная надстройка в шине формирует глобальный сервер, т.е. единую для обеих подсистем объектно-ориентированную магистраль.

*Однокомпьютерная модель* предполагает использование традиционного компьютера, оснащенного дополнительными контроллерами для связи с мехатронными объектами управления. В их числе могут быть: контроллер следящих приводов, программируемый контроллер PLC (*Programmable Logic Controller*), специальные устройства для управления технологическими процессами и др. В качестве операционной может быть использована система Windows NT, которая, однако, не является системой реального времени и в этой связи требует соответствующего расширения. Система RTX модифицирует слой HAL (*Hardware Abstraction Layer*) операционной системы Windows NT и дополняет его диспетчером потоков реального времени.

Современные принципы построения архитектуры ЧПУ заключаются в четком разгра-

ничении между системными, прикладными и коммуникационными компонентами, возможности независимого развития любого из этих компонентов, как на основе оригинальных разработок, так и путем встраивания покупных программных систем, а также в организации взаимодействия подсистем "клиент-сервер" и стандартизации интерфейсов и транзакций.

В настоящее время наиболее универсальными являются открытые системы ЧПУ, подсистемы которой (включая интерфейс оператора, Motion Control и контроллер электроавтоматики SoftPLC) стали полностью программно-реализованными на единой компьютерной Windows-платформе. Преимущества программной реализации подсистемы формообразования объединились с достоинствами цифровых следящих приводов.

Эволюция цифрового привода привела к созданию *интеллектуальных цифровых приводов*, обеспечивающих повышенные скорость и точность. Для их использования необходим быстродействующий цифровой стандартный интерфейс, который обеспечивал бы возможность подключения приводов от любых производителей. Всем этим требованиям отвечает SERCOS - интерфейс (*Serial Realtime Communication System*) для цифровых следящих приводов, который стал базой международного стандарта IEC 61491 и европейского стандарта EN 61491 для систем ЧПУ.

Каждая координатная ось управляется циклическими командами, генерируемыми интерполятором системы управления. При этом обеспечиваются высокая точность отдельной оси и совокупная точность интерполируемого движения. Обработка сигналов интеллектуального цифрового привода выполняется при помощи микроконтроллера. Микроконтроллер способен не только осуществлять традиционное управление моментом и скоростью подачи, но и выполнять тонкую интерполяцию и позиционное управление с исключительно коротким вычислительным циклом. В сравнении с традиционными приводами достигается максимально высокая точность, причем различие особенно заметно при высоких скоростях подачи.

Цифровые приводы работают циклически, а циклом является интерполяционный цикл системы ЧПУ. В каждом цикле значения переменных обновляются для каждого привода. Цифровой интерфейс должен обеспечить синхронизацию циклов контроллера и следящих приводов. Такая синхронизация осуществляется с микросекундной точностью, поскольку оказывает влияние на взаимную координацию приводов и одновременное выполнение команд. SERCOS интерфейс осуществляет синхронизацию для любого количества следящих приводов. Отдельные следящие приводы объединяются по своим входам в "кольцо" при помощи оптоволоконного кабеля.

Для унифицированного доступа к следующему поколению станков с ЧПУ, имеющих Web-доступ, используют язык XML, программное обеспечение управления движением XMC, OMAC-схемы (*Open Modular Architecture for Controllers*) и протокол SOAP (*Simple Object Access Protocol*). Структура такого доступа приведена на рис. 3.7.

При этом реализуется концепция взаимодействия оборудования в рамках всего жизненного цикла производства изделий с использованием MES-систем (*Manufacturing Enterprise Solutions*).

MES-система - это автоматизированная система управления и оптимизации производственной деятельности, которая в режиме реального времени инициирует, отслеживает, оптимизирует и документирует производственные процессы от начала выполнения заказа до выпуска готовой продукции.

Для осуществления принципа "проектирование и производство в любом месте" (*design anywhere, build anywhere*) создана архитектура системы ЧПУ для ОС Windows типа GNC (*Generative Numerical Control*) - интеллектуальная система ЧПУ.

В ряде производств, включая автомобильную промышленность, используется концепция, согласно которой станок с ЧПУ становится узлом корпоративной Web-сети. Наибольшую эффективность OMAC API имеет в Web-домене коллективно используемых станков с ЧПУ. Функции OMAC API конвертируются в язык Internet. Центральным элементом в этой архитектуре служит программный компонент - Windows-расширение XMC (*extension for*

*Motion Control*) для каждого конкретного станка с ЧПУ. Следовательно, ХМС размещается между OMAC API и станком с ЧПУ. ХМС-XML система использует OMAC XML схемы и SOAP протокол, чтобы создать гомогенную информационную структуру над системами ЧПУ от разных производителей. Единственным ограничением служит обязательное использование ОС Windows в интерфейсе оператора.



Рисунок 3.7. Структура Web-доступа к системам с ЧПУ

Многочисленные пользователи устанавливают дополнительное оборудование, чтобы сделать традиционные системы ЧПУ открытыми. Как правило, в обновлении механической части станков нет нужды, а существенные улучшения могут быть достигнуты путем дооснащения станков с ЧПУ внешним одноплатным компьютером МТІВ (*Machine Tool Interface Board*). Цель состоит в превращении системы ЧПУ в узел корпоративной сети, использующий OMAC XML схемы как стандартный универсальный язык ЧПУ. Система ЧПУ становится Web-сервером, который получает, разделяет и распространяет информацию по всему предприятию. XML используется для распространения информации в пределах и за пределами предприятия.

Другая тенденция в развитии современных систем ЧПУ состоит в создании STEP-NC интерфейса. В рамках этой тенденции работает система ЧПУ типа STEP-NC (STEP-NC-CNC), которая получает STEP-NC данные, распознает их и не нуждается в дополнительных инструкциях для выполнения задания.

Фаза активного развития STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*) приходится на начало 90-х годов. Для описания форматов данных был создан язык EXPRES, а для графического представления - язык EXPRES-G. STEP-NC унаследовал использование этих языков.

Параллельно с программной индустрией качественные изменения произошли и в области моделирования и представления данных. Во-первых, появился графический язык моделирования UML (*Unified Modeling Language*) ISO 19501, ставший стандартом для визуализации, спецификации, конструирования и документирования систем, в которых ключевая роль принадлежит программному обеспечению. Во-вторых, появился стандарт разметки документов - расширяемый язык разметки XML (*extensible Markup Language*). Формат XML для компьютерных документов достаточно гибок, и его можно приспособить для самых разнообразных сфер деятельности. XML определяет общие правила синтаксиса, используемые для разметки данных при помощи простых доступных для чтения тегов.

Сегодня около 80% разработчиков на фирмах, производящих системы ЧПУ, связаны с программным обеспечением, и лишь 20% занимаются аппаратурой. Это и определяет долю

программного обеспечения в современной системе ЧПУ.

*Стандарт ISO 14649* предоставляет системе ЧПУ обширную связанную информацию, включающую четыре раздела:

- описание задач управления,
- технологическая информация,
- описание инструмента,
- геометрическое описание.

Раздел задач представляет собой логическую последовательность выполняемых блоков и типов данных. Детали каждого шага операции описаны в разделе технологической информации; причем они связаны отношениями с описанием инструмента и геометрическим описанием.

Важнейшим элементом технологического процесса служат типовые формы "*features*", которые определяют области удаляемого материала заготовки, а их внешний вид является частью внешнего вида изделия "*workpiece*". Типовые формы задают параметрически или в виде совокупности образующей и направляющей. Особый случай представляют поверхности свободной формы, для которых определяют область, в пределах которой поверхность свободной формы размещается.

Системы ЧПУ, воспринимающие стандарт STEP-NC (ISO 14649), могут относиться к одному из трех типов. Первый базируется на традиционном использовании G-кодов (ISO 6983), т.е. построен на основе обычной системы ЧПУ без каких-либо внутренних изменений. Управляющие программы ISO 14649 конвертируются в формат ISO 6983 на уровне постпроцессирования. Второй тип имеет встроенный интерпретатор ISO 14649, который интерпретирует управляющие программы самостоятельно. При этом какие-либо функции искусственного интеллекта отсутствуют. Третий тип (со встроенной системой искусственного интеллекта) является полномасштабным вариантом STEP-NC-CNC, располагающим следующими возможностями:

- реализация интеллектуальных сетевых функций системы ЧПУ, поддерживающих цепочку CAD-CAM-CNC, выполненную на основе модели ISO 14649;
- полная автоматизация цикла от наладки до измерения;
- возможность автономного управления объектом.

Управляющие программы ISO 14649 содержат самые разнообразные данные. Используя подобные данные, система ЧПУ способна генерировать траектории инструмента в соответствии с текущей цеховой ситуацией, а также самостоятельно составлять планы операции и адекватно реагировать на непредвиденные события.

## **2.2 Промышленные роботы и робототехнические системы**

Наиболее универсальным оборудованием, обеспечивающим гибкость автоматизированных производств, являются промышленные роботы (ПР).

*Промышленный робот* - это автоматическая машина, стационарная или мобильная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения двигательных и управляющих функций в производственном процессе.

*Манипулятор* - управляемое устройство для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека при перемещении объектов в пространстве, оснащенное рабочим органом, предназначенным для непосредственного выполнения технологических операций и (или) вспомогательных переходов.

В данном определении под *перепрограммируемостью* понимается такое свойство ПР, как замена управляющей программы автоматически или при помощи человека-оператора. К перепрограммированию относится изменение последовательности и (или) значений перемещений по степеням подвижности, а также управляющих функций с помощью средств управления на пульте устройства управления.

Структурная схема ПР, основные элементы конструкции и виды движений рабочих органов приведены на рис. 3.8.

Промышленные роботы являются универсальным средством автоматизации производственных процессов в условиях обширной номенклатуры и частой смены изделий. Они могут выполнять как основные, так и вспомогательные операции по обслуживанию технологического оборудования.

На базе ПР создаются *роботизированные технологические комплексы (РТК)*, являющиеся совокупностью единицы технологического оборудования, ПР и средств оснащения, которые функционируют автономно и осуществляют многократные циклы.

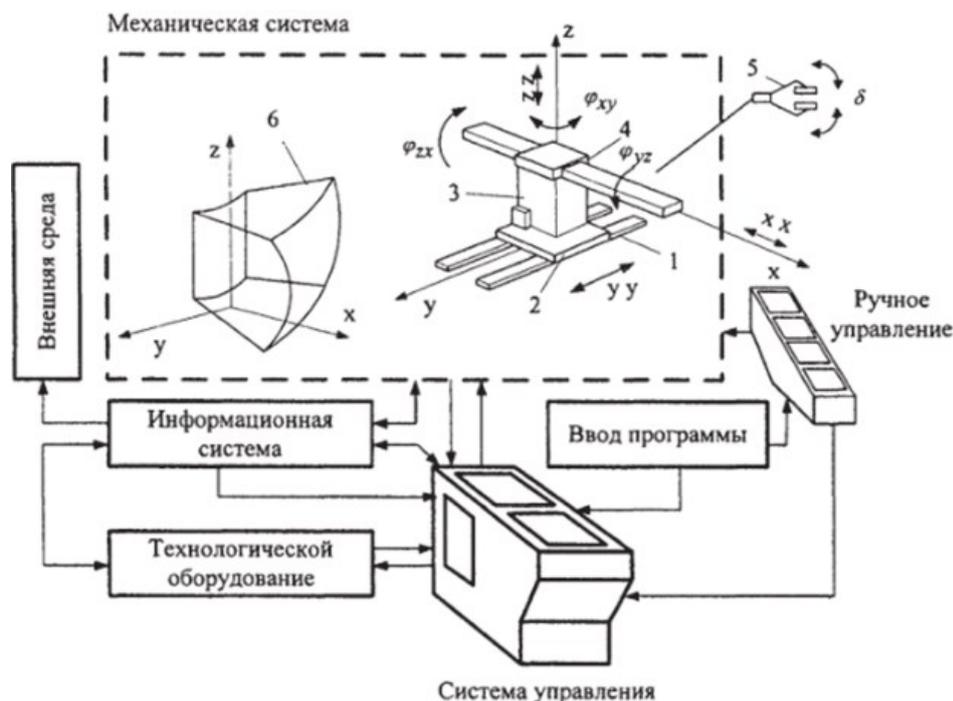


Рисунок 3.8. Структурная схема промышленного робота

1 - путьпровод; 2 - основание; 3 - корпус; 4 - манипулятор; 5 - захватное устройство; б - рабочая зона и система координат основных движений ПР;  $xx$  - направление движения манипулятора вдоль продольной оси;  $yy$  - направление движения корпуса робота по путьпроводу;  $zZ$  - направление движения манипулятора вверх-вниз;  $(p^{\wedge})$  - угол поворота корпуса робота вокруг вертикальной оси,  $(p_u)$  - угол поворота руки в вертикальной плоскости;  $(p^{\wedge})$  - угол поворота захвата относительно оси  $xx$ ,  $\delta$  - направление движения захвата детали

Средствами оснащения РТК могут быть устройства накопления, ориентации, поштучной выдачи объектов производства и другие устройства, обеспечивающие функционирование РТК.

При обслуживании основного технологического оборудования ПР осуществляют такие операции, как загрузка и разгрузка деталей, контроль, смена инструментов, уборка отходов, установка и смена средств контроля в автоматическом режиме. Широко распространено применение ПР для обслуживания складского оборудования. В транспортных системах ПР могут выполнять самостоятельные операции по перемещению и накоплению грузов, а также по обслуживанию конвейерных линий.

#### Тема 4. Электрические датчики физических величин и параметров технологических процессов

##### Виды датчиков с электрическим выходом

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

Понятие «датчик» естественно ассоциируется с техникой измерений. Обобщенный термин «датчик» укрепился в связи с развитием САУ, как элемент цепочки «датчик —

устройство управления — исполнительное устройство — объект управления». В качестве отдельной категории использования датчиков в системах автоматической регистрации параметров можно выделить!» их применение в системах автоматизации научных исследований и экспериментов.

В литературе встречаются различные определения датчиков:

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

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

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

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

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

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

- 4) датчик должен иметь достаточную чувствительность и стабильные во времени характеристики.
- 5) сигналы датчика должны действовать в направлении от входа к выходу, влияние нагрузки на работу датчика должно быть минимальным или отсутствовать;
- 6) датчик должен иметь высокое быстродействие;
- 7) датчик должен быть устойчивым к воздействиям внешней среды.

Классификация датчиков. Датчики можно классифицировать по различным признакам. Одной из таких возможностей является их разделение по входным и выходным величинам. При этом наибольший интерес представляют датчики механических, термических, оптических и электромагнитных величин с электрическим выходом. Датчики с электрическим выходом имеют ряд преимуществ перед другими. Электрические величины легко преобразовывать и передавать на расстояние с большой скоростью. Их можно преобразовывать в цифровой код. По принципу действия различают датчики генераторные и параметрические, а также:

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

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

#### Контактные датчики

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

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

Контактные датчики работают как на постоянном, так и на переменном токе. Конструктивно контактные датчики могут быть однопредельными и многопредельными. Если измеряемая величина изменяется в значительных пределах, то используются многопредельные датчики. Примером контактных датчиков служит электромагнитное реле, в котором при достижении известного значения входной величины выходная изменяется скачком.

Широкое распространение получили контактные датчики механических величин. Они служат, например, для выбраковки изделий («большее» или «меньшее»), преобразуя механическую величину в электрическую. Пример контактного датчика показан на рис. 4.1.

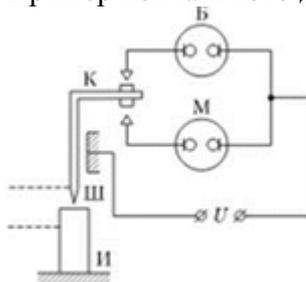


Рисунок 4.1. Контактный датчик

Преимуществами контактных датчиков являются: предельная простота; широкое ис-

пользование в системах автоматики.

Недостатки: сложность осуществления непрерывного контроля; ограниченный срок службы контактной группы.

### Реостатные и потенциометрические датчики

Потенциометрические датчики — это приборы, действия которых основаны на изменении их (активной) сопротивлении при изменении длины, площади сечения  $S$ , удельного сопротивления  $\rho$ :

Реостатные датчики это датчики, у которых меняется сопротивление при перемещении подвижного контакта. Подвижный контакт реостата механически связан с объектом, перемещение которого (линейное или угловое) нужно преобразовать. Поскольку в перемещение могут быть преобразованы многие физические величины (давление, расход, уровень и др.), то реостаты фактически являются преобразователями неэлектрических величин в электрические.

Наибольшее распространение получила потенциометрическая схема включения реостатного датчика в виде делителя, работающая как на постоянном, так и на переменном токе. Вопросы использования потенциометров в составе САУ в качестве измерителей рассогласования рассмотрены в гл. 3. Схема потенциометрического датчика показана на рис. 4.2.

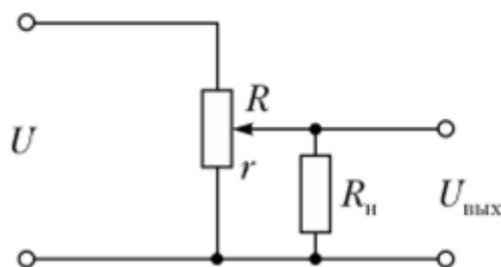


Рисунок 4.2. Потенциометрический датчик

При перемещении движка выходное напряжение меняется пропорционально входной величине. Таким образом, осуществляется преобразование перемещения в напряжение.

Конструктивно потенциометрические датчики различают по способу изготовления сопротивления:

- ламельные с постоянным сопротивлением;
- проволочные с непрерывной обмоткой;
- с резистивным слоем.

Ламельные датчики используют для проведения довольно грубых измерений. В них постоянные по номиналу резисторы припаиваются к ламеле, как показано на рис. 4.3. На ламеле чередуются проводящие и непроводящие слои, по которым скользит подвижный контакт. При его перемещении выходное напряжение такого делителя будет меняться дискретно.

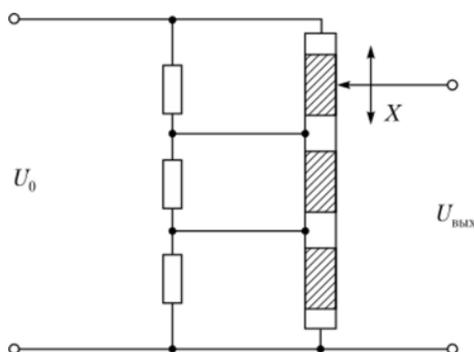


Рисунок 4.3 Схема потенциометрического датчика на ламеле

Проволочные потенциометрические датчики содержат каркас из непроводящего материала, на который наматывается проволока с высоким удельным сопротивлением. Обычно это проволока из константана или манганина, а для высоких температур — железо- и никель-

хромовые сплавы. Подвижные контакты выполняются из более мягкого материала, чтобы исключить истирание провода.

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

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

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

Достоинства потенциометрических датчиков:

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

Недостатки:

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

#### **Пьезоэлектрические датчики**

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

Пьезоэлектрический эффект обладает обратным явлением. Если приложить к кристаллу напряжение, то это приведет к появлению механической деформации. Это явление широко применяется в разных типах пьезопреобразователей. Пьезосенсоры чувствительны только к изменению внешних условий, т.е. эти устройства переменного тока. Поскольку пьезодатчик подобен электрическому конденсатору, то количество электричества  $q$  появившееся из-за воздействия механического возмущения, заряжает грани пьезоэлемента до напряжения  $U$  определяемое как  $U = q/C$ , где  $C$  — емкость между проводниками.

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

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

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

Пьезодатчики можно разделить на два класса в зависимости от физического эффекта, лежащего в их основе. К первому классу относятся датчики, использующие прямой пьезоэффект.

зоэффект. Они используются для измерения линейных и угловых скоростей, динамических и квазистатических давлений и усилий и др. Ко второму классу относятся так называемые резонансные пьезодатчики, в основе которых лежит обратный пьезоэффект. Кроме того, в основе пьезодатчиков могут лежать другие физические эффекты (тензо-чувствительность, термочувствительность, акусточувствительность), что позволяет использовать их для измерения статических и динамических давлений и усилий, концентрации газа, вязкости, углов наклона и др.

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

К недостаткам пьезокерамики следует отнести низкую температурную устойчивость по сравнению с кварцем. Однако сейчас разработаны пьезо-керамические элементы на основе кобальта, способные выдерживать температуру, равную  $700^{\circ}\text{C}$  и более.

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

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

#### **Тензометрические датчики**

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

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

Изменение сопротивления проводника тензодатчика можно объяснить двумя причинами:

- 1) изменением геометрических размеров проводника (длины или диаметра);
- 2) изменением удельного сопротивления материала тензодатчика.

Коэффициент тензочувствительности — безразмерная величина. Она может быть как положительной (для материалов, у которых сопротивление увеличивается при растяжении), так и отрицательной (для материалов, у которых сопротивление уменьшается при растяжении).

Обычно сопротивление тензодатчика находится в пределах от 10 до 1000 Ом. Материалом для тензодатчиков служат нержавеющая или легированная сталь, а также алюминий.

Конструктивно тензодатчики выполняются наклеиваемыми и не наклеиваемыми.

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

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

Современные тензодатчики обладают большим разнообразием конструкций: мостовой, шайбовый, сильфонный, одноточечный и колонный. По максимальной нагрузке различают тензодатчики массой от нескольких грамм до десятков и сотен тонн. Чувствительность

тензодатчика определяется отношением изменения напряжения на датчике к единице нагрузки. Это изменение напряжения составляет обычно 1-3 мВ на каждый вольт питающего датчик напряжения.

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

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

К недостаткам стоит отнести температурную чувствительность.

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

### Индуктивные датчики

Индуктивные датчики служат для бесконтактного получения информации о перемещении рабочих органов машин, механизмов роботов и т.д. и преобразования этой информации в электрический сигнал. Принцип действия индуктивного датчика основан на изменении индуктивности обмотки на магнитопроводе в зависимости от положения отдельных элементов магнитопровода. Простейший индуктивный датчик показан на рис. 4.4.

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

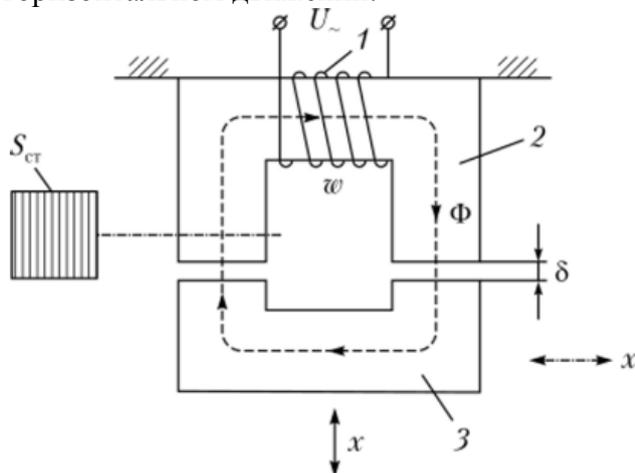


Рисунок 4.4 Простейший индуктивный датчик

Поскольку активное сопротивление — величина постоянная, то изменение тока может проходить за счет изменения индуктивной составляющей, которая зависит от величины зазора  $\delta$  или сечения магнитопровода  $S_{ст}$ . Каждому значению зазора  $\delta$  соответствует свое значение тока, создающее падение напряжения на  $R_n$  ( $U = I(5)$ ).

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

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

Разновидностью индуктивных датчиков является дифференциальный индуктивный датчик, состоящий из двух независимых датчиков (рис. 4.5).

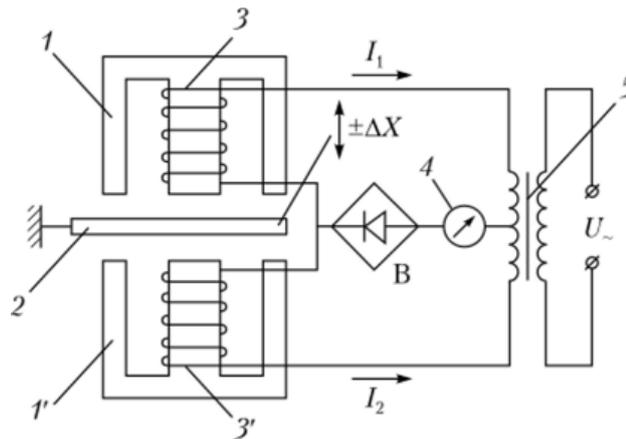


Рисунок 4.5. Дифференциальный индуктивный датчик

Этот датчик состоит из двух магнитопроводов 1, 1' с катушками 3, 3' и общим якорем 2. Для питания дифференциальных индуктивных датчиков используется источник питания переменного тока на трансформаторе 5 со сдвоенной вторичной обмоткой. Средняя точка этой обмотки соединяется с общей точкой обмоток катушек 3, 3' через прибор 4, регистрирующий ток в этой цепи, и нагрузку, расположенную в блоке В. В этом же блоке располагается демодулятор (с его схемой и принципом работы можно ознакомиться в гл. 4), подсоединенный к нагрузке. Демодулятор осуществляет преобразование модулированного по амплитуде переменного напряжения на нагрузке в аналоговый выходной сигнал датчика.

При среднем положении якоря 2, когда воздушные зазоры одинаковые, то индуктивные сопротивления катушек 3, 3' также одинаковые, ток в диагонали, измеряемый прибором 4, будет равным нулю. При отклонении якоря под действием контролируемой величины  $I \neq 0$ .

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

- 1) от влияния внешних электромагнитных полей;
- 2) от нелинейности характеристик;
- 3) конструктивную;
- 4) технологическую и температурную;
- 5) от старения датчика.

Определяющей здесь является погрешность от нелинейности характеристик.

Достоинства индуктивных датчиков:

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

Недостатки:

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

### Трансформаторные датчики

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

На рис. 4.6 представлен дифференциальный трансформаторный датчик с угловым перемещением якоря.

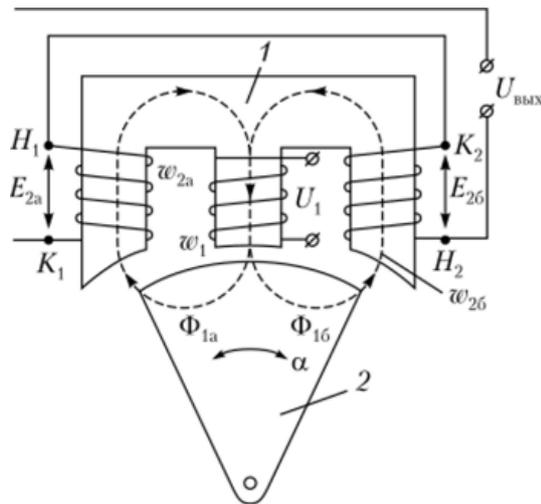


Рисунок 4.6 Дифференциальный трансформаторный датчик угла

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

Достоинства трансформаторных датчиков:

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

Недостатки:

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

Емкостные датчики

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

В датчиках углового перемещения на рис. 7.73 емкость меняется из-за изменения площади взаимного перекрытия пластин.

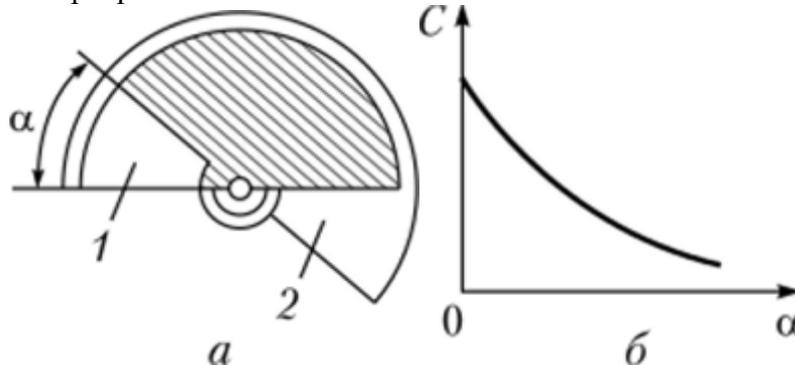


Рисунок 4.7 Емкостный датчик углового перемещения

В качестве измерительных схем обычно применяют дифференциальные датчики, включаемые в мостовую измерительную схему (рис. 4.8).

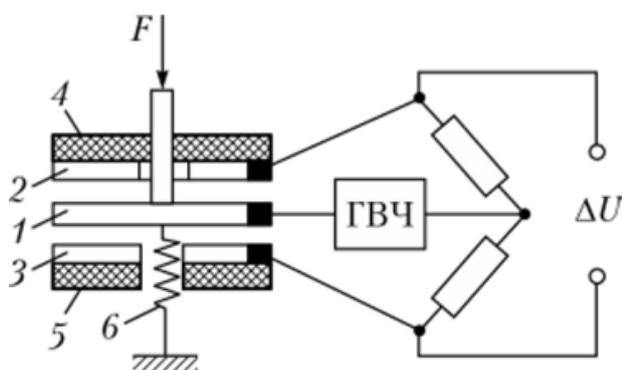


Рисунок 4.8 Дифференциальный емкостный датчик в мостовой схеме

На металлическую обкладку 1 действует возмущение  $F$ . Обкладка закреплена на пружинной подвеске 6. При отсутствии возмущения  $F$  она занимает симметричное положение относительно двух неподвижных обкладок 2 и 3, изолированных от корпуса прокладками 4 и 5, и, следовательно, их емкости равны. При наличии возмущения емкости получают приращения разных знаков. Поскольку эти емкости включены в смежные плечи моста, то чувствительность датчика увеличивается вдвое.

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

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

Широкое распространение имеют также датчики уровня жидкости.

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

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

Недостатки:

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

#### **Датчики температуры**

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

Существуют два основных способа измерения температуры — контактный и бесконтактный. Контактный способ основан на непосредственном контакте с исследуемым объек-

том. Он обеспечивает достаточно высокую точность измерений, но обладает относительно низким быстродействием, связанным с процессом прогрева материала самого датчика при вступлении в контакт с объектом. Бесконтактный способ основан на передаче тепловой энергии через лучеиспускание. Сам датчик устанавливается на некотором расстоянии от исследуемого объекта, поэтому его показания менее точны, чем при контактном способе.

### **Термометры сопротивления**

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

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

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

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

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

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

Температурный диапазон для различных ТС составляет:

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

Преимущества ТС:

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

Недостатки ТС:

- 1) относительно малый диапазон измерений (по сравнению с термопарой);
- 2) дороговизна (в сравнении с термопарой из благородных металлов);

### **Термопара**

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

Конструкцию термопары можно представить в виде, показанном на рис. 4.9.

При равенстве температур  $T_1$  и  $T_2$ , обоих слоев результирующая термо- ЭДС равна ну-

лю. Отметим, что значение результирующий термоЭДС зависит только от металлов проводников и от температур слоев.

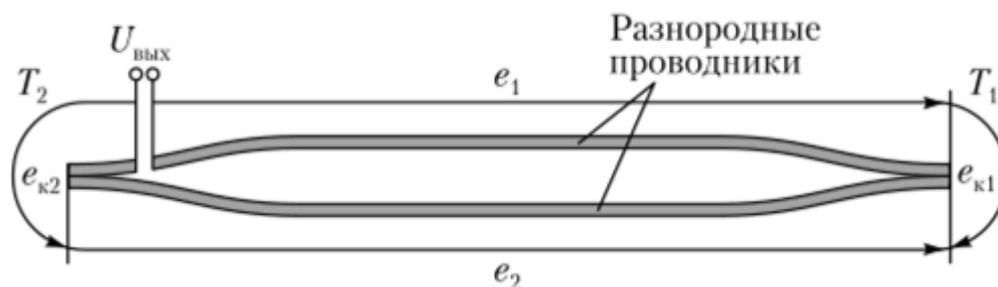


Рисунок 4.9. Схема измерения температуры термопарой

Термопары позволяют измерять температуру в диапазоне от  $-200$  до  $2200^{\circ}\text{C}$ . Для их изготовления используют как благородные металлы и их сплавы (платина, платинородий), так и неблагородные (хромель, алюмель).

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

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

Следует помнить, что развиваемая термоЭДС в значительной степени зависит от чистоты применяемых материалов. Для измерения температур ниже  $-50^{\circ}\text{C}$  находят применение термопары типа медь-константан (до  $-270^{\circ}\text{C}$ ), а для температур свыше  $1800^{\circ}\text{C}$  изготавливаются термопары на основе тугоплавких металлов.

Преимущества термопар:

- высокая точность измерения температуры (до  $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ );
- большой температурный диапазон (от  $-250$  до  $2500^{\circ}\text{C}$ );
- простота конструкции;
- дешевизна;
- надежность.

Недостатки:

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

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

### Пирометры

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

Различают три вида пирометров:

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

пературы объекта;

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

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

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

Ультразвуковые и струнные датчики

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

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

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

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

Существует несколько способов обнаружения объектов с помощью ультразвука:

1) непосредственное обнаружение с одним или двумя отдельными преобразователями. Контролируется пространство перед датчиком на наличие объекта, от которого отражается ультразвуковая волна;

2) рефлекторный метод. Контролируется пространство между датчиком и рефлектором. Отраженный сигнал улавливается приемником. Срабатывание датчика происходит при пересечении луча объектом;

3) метод прерывания луча или оптоэлектрический метод. Излучатель и приемник устанавливаются на одной линии. Звуковая волна проходит между ними только один раз. Датчики, работающие по прерыванию луча, часто называют барьерными.

Достоинства ультразвуковых датчиков:

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

Недостатки датчиков:

- широкая диаграмма направленности;
- чувствительность к случайным препятствиям;

- невысокая точность при измерении температуры, давления и состава воздуха;
- невысокое быстродействие;
- относительно высокая стоимость.

### Струнные датчики

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

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

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

На рис. 4.10 представлен датчик для измерения давления. Он состоит из струны 1, возбuditеля 2 и приемника 3. Одним концом струна жестко закреплена, а вторым концом соединена с мембраной-преобразователем 4. При изменении давления меняется натяжение струны. С помощью электромагнита возбuditеля струна выводится из состояния покоя и начинает колебаться с частотой  $f$ , зависящей от давления  $P$ . Приемник 3 преобразует перемещение струны в электрический сигнал той же частоты. В качестве приемника чаще всего используют электромагнитный датчик, который может быть попеременно то возбuditелем, то приемником. При подаче напряжения он возбуждает колебания струны, а когда струна уже колеблется, то с этой же обмотки снимается напряжение, частота которого равна частоте колебаний струны.

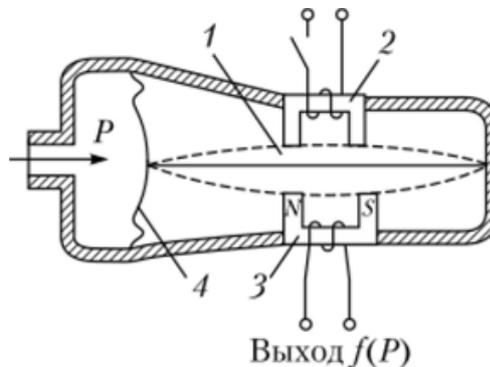


Рисунок 4.10 Струнный датчик для измерения давления

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

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

### Фотоэлектрические датчики

Фотоэлектрическим называют датчик, который реагирует на изменение освещенности. В них используется явление фотоэффекта, под которым понимается изменение свойств

вещества при разной освещенности. Принцип фотоэффекта заключается в том, что при освещении поверхности металла или полупроводника частицы лучистой энергии передают электронам освещенного вещества дополнительную энергию. В результате этого ускоряется движение электронов и изменяется ток через фотодатчик.

Фотодатчик состоит из источника светового потока и приемника. В качестве источника может быть исследуемый объект, отражающий световой поток либо излучающий его сам, как это показано на рис. 4.11.

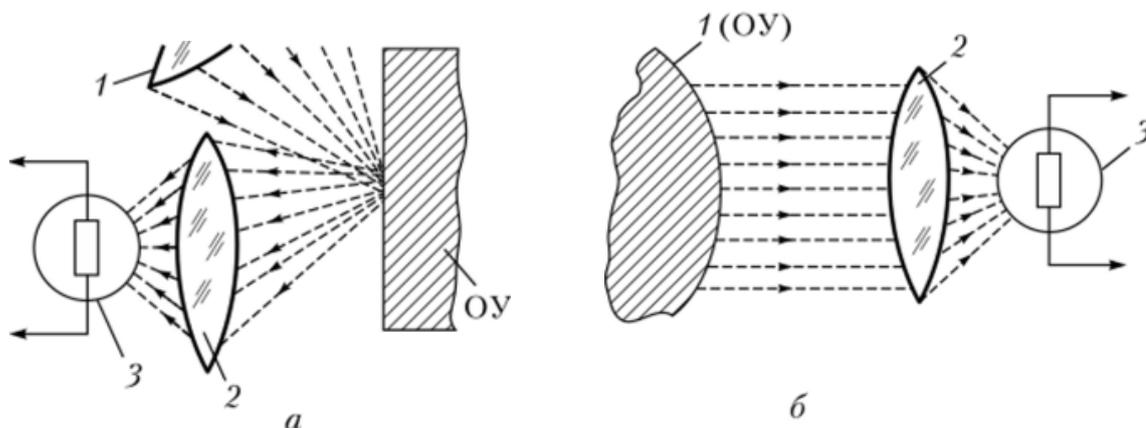


Рисунок 4.11 Фотодатчик:

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

Фотоэлементы обладают световой характеристикой, которая зависит от чувствительности фотоэлемента.

В фотоэлектрических датчиках используют три вида фотоэффекта:

- внешний, состоящий в том, что под влиянием светового потока происходит эмиссия электронов из катода электронной лампы. Величина тока эмиссии зависит от освещенности катода;
- внутренний, состоящий в том, что электропроводность (активное сопротивление) полупроводника находится в зависимости от его освещенности;
- вентильный фотоэффект называют промежуточным, при котором освободившиеся электроны переходят из слоя освещенного вещества в слой неосвещенного вещества, отделенный запирающим слоем. Ввиду избытка электронов в одном слое и недостатка в другом возникает ЭДС, зависящая от освещенности.

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

### Энкодеры

Энкодеры — преобразователи линейных и угловых перемещений в электрический сигнал. Известные и широко используемые в системах автоматики электромеханические преобразователи угловых перемещений и скорости (тахогенераторы, сельсины, вращающиеся трансформаторы). Различают два типа энкодеров: 1) инкрементальные; 2) абсолютные.

Инкрементальные энкодеры предназначены для определения угла поворота вращающегося объекта. Они генерируют последовательный импульсный цифровой код, содержащий информацию относительно угла поворота объекта. Если вал останавливается, то останавливается и передача импульсов. Основным параметром датчика является количество импульсов за один оборот. Мгновенную величину угла поворота определяют количеством импульсов от старта. По вычислению количества импульсов во времени определяют угловую скорость в оборотах в минуту. Для определения направления вращения используют два выходных канала, в которых идентичные последовательности импульсов сдвинуты друг от друга на  $90^\circ$ . Для того чтобы найти абсолютное положение вала, имеется нулевая метка.

Абсолютные энкодеры выделяют цифровой код, различный для каждого положения

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

По принципу действия различают энкодеры:

- оптические;
- магнитные;
- магниторезистивные.

### **Датчики Холла**

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

Датчик Холла — это, по существу, датчик магнитного поля.

Практическое применение ЭДС Холла началось с развитием микроэлектроники и микросхемотехники. Датчики стали применять в генераторах Холла. Датчики могут быть линейными (датчики тока, положения, расхода и т.п.) и логическими, или цифровыми (датчики приближения, частоты вращения, импульсов и т.д.).

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

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

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

Основные характеристики линейных датчиков Холла:

- полная шкала выхода соответствует диапазону выходных напряжений, в которых нелинейность не выходит из заданных пределов. Определяется как часть напряжения питания;
- диапазон измеряемой индукции, устанавливаемый изготовителем в гауссах или миллитеслах;
- чувствительность, определяемая как крутизна характеристики преобразования в милливольтгах на гаусс или милливольтгах на миллитеслу;
- погрешность линейности характеристики преобразования — отклонение статической характеристики преобразования датчика от идеальной прямой линии в заданном диапазоне. Один из способов определения погрешности линейности состоит в использовании метода наименьших квадратов, который математически обеспечивает получение прямой линии наилучшего приближения к экспериментальным точкам данных. Указывается в процентах от полной шкалы;
- напряжение нуля магнитного поля — значение выходного напряжения, соответствующее отсутствию магнитного поля;
- температурный дрейф нуля — изменение напряжения нуля, вызванное изменением температуры. Указывается в процентах на градус от напряжения нуля, соответствующего  $25^{\circ}\text{C}$ ;
- температурный дрейф чувствительности — изменение чувствительности, вызванное изменением температуры. Указывается в процентах на градус от напряжения полной шкалы,

соответствующего 25°C;

- время отклика, которое определяется как время изменения выходного сигнала от 10 до 90% установившегося значения его приращения при скачкообразном изменении магнитного поля;
- полоса пропускания  $f_s$  определяется по уровню снижения чувствительности на 3 дБ в режиме малого сигнала.

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

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

## **Тема 5. Усилительно-преобразовательные элементы автоматических систем и систем автоматического управления и микропроцессорные регуляторы**

### ***Преобразование сигналов в автоматических системах и системах автоматического управления***

Усилительно-преобразовательные устройства в структуре одноконтурной системы, предшествуют силовым блокам усилителей мощности и служат для согласования, усиления и коррекции сигналов датчиков обратных связей и измерителя рассогласования. В составе этих устройств могут использоваться преобразователи сигналов (чаще всего это демодуляторы и модуляторы), предварительные усилители переменного и постоянного тока, дискретные логические элементы, корректирующие устройства как простейшие на пассивных элементах или операционных усилителях, так и многофункциональные в составе микропроцессорных регуляторов.

Наиболее часто встречающиеся формы сигналов в автоматических системах:

- 1) аналоговые сигналы (будем так называть медленно меняющиеся, непрерывные сигналы);
- 2) модулированные сигналы со следующими видами модуляций:
  - амплитудная модуляция (АМ),
  - частотная модуляция (ЧМ),
  - фазовая модуляция (ФМ),
  - амплитудно-импульсная модуляция (АИМ),
  - широтно-импульсная модуляция (ШИМ);
- 3) цифровые сигналы.

В частности, в следящих системах широкое распространение получили преобразователи, преобразующие аналоговые (относительно медленно меняющиеся) сигналы в амплитудно-модулированные и наоборот.

Смысл любого вида модуляции прежде всего связан с преобразованием низкочастотного спектра входного аналогового сигнала в более высокочастотный спектр модулированного. Такое преобразование облегчает реализацию электронных блоков предварительного усиления и выработки управляющих сигналов для силовых блоков усилителей мощности. Обратное преобразование модулированного сигнала в аналоговый также часто встречается. Например, в случае использования корректирующих цепей на пассивных элементах, рассчитанных на работу с аналоговым сигналом, формирования управляющих сигналов двигателей постоянного тока.

Виды модуляций АМ, ЧМ и ФМ связаны с использованием так называемого опорного сигнала, или сигнала «несущей частоты», синусоидальной формы  $A_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ , показанного на рис. 5.1.

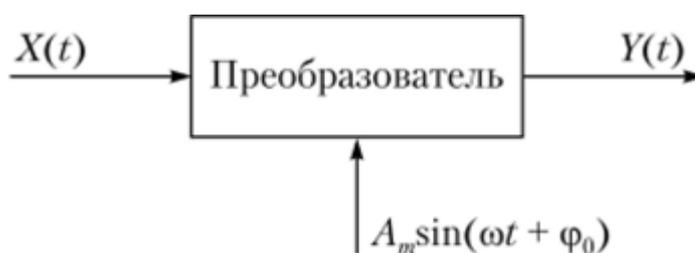


Рисунок 5.1. Преобразователь с опорным сигналом

Осуществляя пропорциональную зависимость амплитуды  $A_m$  от входного аналогового сигнала  $X(t)$ , можно получить АМ-сигнал на выходе преобразователя (модулятора). Аналогично, осуществляя пропорциональную зависимость частоты со опорного сигнала или начальной фазы  $\varphi_0$  от входного сигнала  $X(t)$ , получаем ЧМ- или ФМ-сигналы на выходе соответствующих модуляторов. АМ-сигналами являются выходные сигналы с трансформаторных измерителей рассогласования, рассматриваемые в гл. 3. Также управляющим сигналом для двухфазных асинхронных двигателей является АМ-сигнал.

Амплитудно-импульсная и широтно-импульсная модуляции в своей основе подразумевают выработку импульсов фиксированной частоты (фиксированного периода  $T$  следования импульсов) на выходе модулятора. При этом амплитуда импульсов должна быть пропорциональна входному аналоговому сигналу в момент появления импульса, а их длительность  $\tau$  постоянной (для АИМ-модуляции) или длительность импульса  $\tau$  должна быть пропорциональна входному аналоговому сигналу  $X(t)$  в момент появления импульса, а амплитуда импульсов — постоянной (для ШИМ-модуляции). Эти виды сигналов показаны на рис. 5.2, а и б соответственно.

Цифровая форма сигнала соответствует АИМ-сигналу при длительности импульсов, равной периоду их следования  $\tau = T$ , а амплитуда импульсов должна быть пропорциональна входному аналоговому сигналу в момент появления импульса, но квантуется по уровню в соответствии с реализуемой разрядностью представления аналогового сигнала в данном модуляторе.

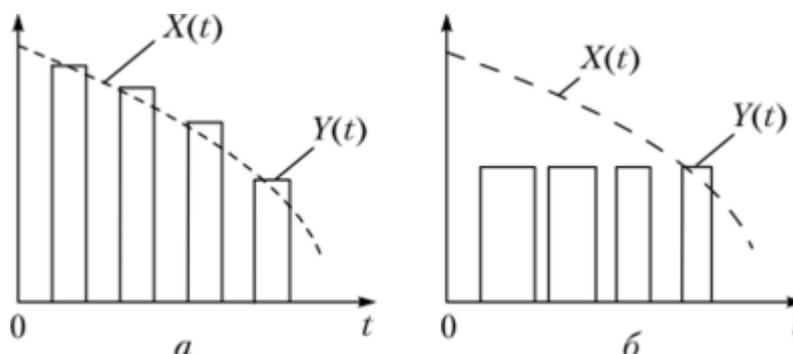


Рисунок 5.2. Виды модуляций:  
а — АИМ; б — ШИМ

### Демодуляторы и модуляторы

Демодуляторы и модуляторы являются преобразовательными устройствами и служат для преобразования АМ-сигнала в аналоговую форму (демодуляторы) и аналоговые сигналы в АМ-форму (модуляторы). По своей конструкции эти устройства обратимы, т.е., меняя местами вход и выход такого устройства, можно из демодулятора получить модулятор и наоборот.

Конструктивно работа этих преобразователей базируется на использовании быстродействующих переключающих устройств. В качестве таких устройств применяют механические реле (обычно поляризованные), диодные схемы или схемы с транзисторами в ключевых режимах. По принципу исполнения демодуляторы и модуляторы выполняют однополупериодными или двухполупериодными.

Однополупериодный демодулятор на поляризованном реле

Рассмотрим принцип работы однопериодного демодулятора на базе поляризо-

ванного механического реле. Схема преобразователя показана на рис. 5.3.

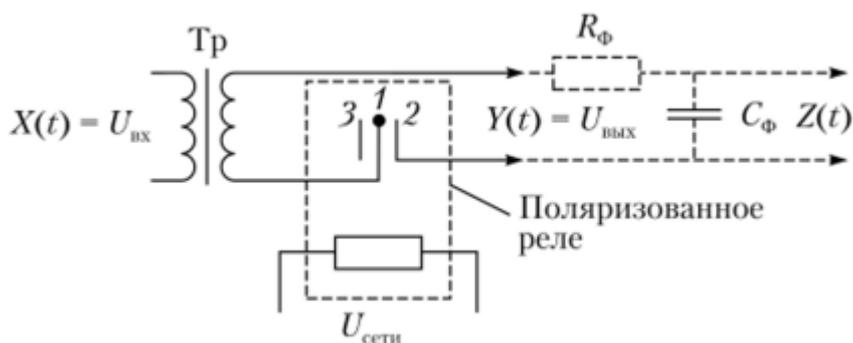


Рисунок 5.3. Схема однополупериодного демодулятора

Входное, модулированное по амплитуде напряжение поступает на первичную обмотку трансформатора Тр. Снимаемое со вторичной обмотки трансформатора напряжение периодически поступает на выход демодулятора в соответствии с полярностью поступающего на обмотку поляризованного реле сетевого напряжения. Поляризованное реле имеет группу из трех контактов. Подвижный средний контакт 1 замыкается с одним из крайних неподвижных (2 или 3) в зависимости от полярности поступающего на обмотку реле сетевого напряжения. В демодуляторе используется только один неподвижный контакт 2, который замыкается только при одной полярности сетевого напряжения на обмотке реле.

Уровень пульсаций выходного сигнала демодулятора достаточно высок, и для их сглаживания применяют низкочастотный фильтр, показанный на рис. 4.3 пунктиром. Этот фильтр является пассивным апериодическим (инерционным) звеном. Как правило, роль резистора с сопротивлением  $Y_{\phi}$  выполняет внутреннее активное сопротивление источника входного сигнала демодулятора, приведенное к выходной обмотке трансформатора Тр, а величина емкости конденсатора  $C_{\phi}$  выбирается. Этот выбор зависит от постоянной времени такого фильтра, которая определяется как  $T_{\phi} = Y_{\phi} C_{\phi}$ . Чем больше эта постоянная, тем эффективнее сглаживаются пульсации.

Основными недостатками демодуляторов и модуляторов на механических реле являются их относительно низкая надежность и ограниченная частота срабатывания, не превышающая 1 кГц. С целью устранения указанных недостатков подобные преобразователи строят с применением полупроводниковых диодов либо с использованием транзисторов в ключевых режимах. Схемы на диодах менее распространены, так как требуют тщательного подбора диодов и балластных резисторов для балансировки схем в отсутствие входного сигнала. В силу этих причин мы на них останавливаться не будем. При необходимости можно обратиться к соответствующей литературе.

Далее рассмотрим однополупериодный демодулятор на транзисторах в ключевых режимах.

#### Однополупериодный демодулятор на транзисторах в ключевых режимах

Если вместо поляризованного реле поставить транзистор в ключевом режиме, управляемый сетевым напряжением, то можно повысить несущую частоту и надежность работы преобразователя. Однако подобное реле на базе одного транзистора обладает неудовлетворительными свойствами в закрытом состоянии из-за относительно большого тока  $I_{к0}$ . Иными словами, подобное реле как бы недостаточно полностью закрывается. Существенно снизить величину  $I_{к0}$  (на 3-4 порядка) удастся встречным включением двух одинаковых транзисторов. В этом случае при закрытом состоянии транзисторов токи  $I_{к0}$  направлены навстречу друг другу и происходит их взаимная компенсация. На практике имеется даже специальная микросхема, применяемая в радиотехнике в качестве детектора. Схема демодулятора с использованием двух встречно включенных транзисторов в ключевых режимах имеет вид, показанный на рис. 5.4.

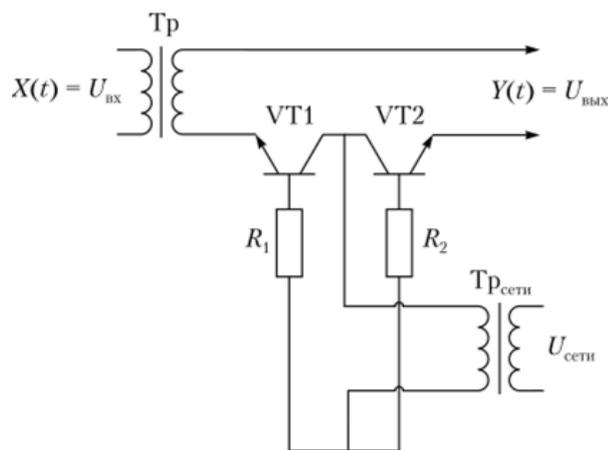


Рисунок 5.4. Однополупериодный демодулятор на транзисторах

В схеме рис. 5.4 через сетевой трансформатор осуществляется одновременное открытие и закрытие встречно включенных транзисторов обычно по схеме с общим коллектором. Формы сигналов в разных точках схемы такого демодулятора, а также вопросы выбора параметров сглаживающего фильтра остаются теми же, что были рассмотрены выше для демодулятора на механическом реле.

#### Однополупериодные транзисторные модуляторы

Как отмечалось выше, модулятор строится по той же схеме, что и демодулятор, но меняются местами вход и выход этих преобразователей. Схема однополупериодного модулятора на транзисторах в ключевых режимах представлена на рис. 5.5. Все обозначения сигналов сохраняются теми же, что и для демодулятора. Однако здесь на вход модулятора поступает аналоговый сигнал, а снимается с выхода АМ-сигнал.

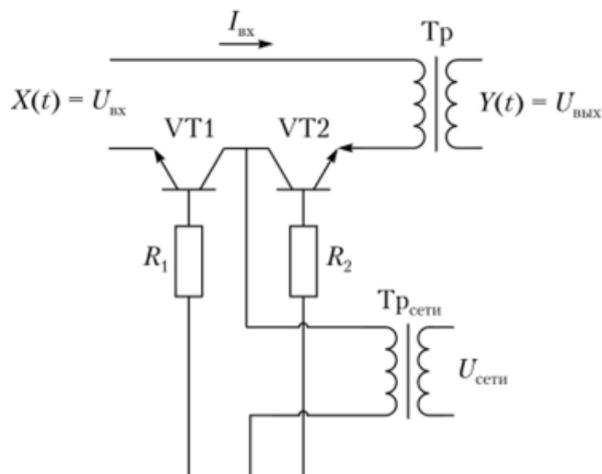


Рисунок 5.5 Однополупериодный модулятор на транзисторах

Пояснение принципа его работы удобно сделать с помощью сопоставления изменений входного тока и напряжений в разных точках схемы, изображенных на рис. 4.8. На этом рисунке показано, что в соответствии с фазой управляющего сетевого напряжения происходит открытие и закрытие транзисторов, через которые пропускается или нет ток на первичную обмотку трансформатора. В соответствии с изменением этого тока в сердечнике трансформатора создается переменный магнитный поток. Этот поток, в свою очередь, наводит ЭДС индукции во вторичной обмотке трансформатора. Данная ЭДС и будет являться выходным сигналом модулятора.

Токи через активно-индуктивную нагрузку не могут меняться скачком и для защиты транзисторов при их закрытии используют шунтирующие диоды. В схемах модуляторов обычно этого не делают при достаточно большом входном сопротивлении нагрузки, на которую работает сам модулятор, т.е. входной ток первичной обмотки трансформатора относительно невелик. Поэтому на рисунке показано упрощенное представление входного тока.

Отметим, что форма выходного сигнала модулятора отличается от синусоидальной на каждом отдельно взятом отрезке времени длиной в половину периода. Вместе с тем подобный сигнал является АМ-сигналом.

### **Двухполупериодные демодуляторы и модуляторы**

Недостатком однополупериодного демодулятора является его относительно невысокий коэффициент передачи и частота пульсаций, совпадающая с несущей частотой. При таком преобразовании теряется большая часть входного АМ-сигнала. Избежать этого удастся в схеме двухполупериодного демодулятора за счет усложнения схемы преобразователя. Фактически используется параллельное включение двух однополупериодных демодуляторов с одним общим входным трансформатором с двумя одинаковыми вторичными обмотками и общим сетевым трансформатором, а также с двумя одинаковыми вторичными обмотками. Вторичные обмотки входного трансформатора подключаются к демодуляторам согласно (в фазе), а вторичные обмотки сетевого трансформатора управляют транзисторами в противофазе. Выходные сигналы демодуляторов суммируются чаще всего с использованием операционного усилителя.

Таким образом, коэффициент передачи двухполупериодного демодулятора увеличивается в 2 раза по сравнению с однополупериодным. Частота пульсаций также возрастает в 2 раза, что увеличивает степень сглаживания пульсаций на выходе демодулятора при тех же ограничениях на выбор постоянной времени сглаживающего фильтра.

Двухполупериодный модулятор делается по той же схеме, что и аналогичный демодулятор. Вместе с тем следует отметить, что в практике построения систем автоматического управления однополупериодные преобразователи нашли большее распространение, так как схемная реализация их значительно проще по сравнению с двухполупериодными. Кроме того, однополупериодные демодуляторы во многих случаях могут строиться вообще без использования входного трансформатора.

### **Аналоговая и цифровая электроника**

Электроника систем управления за десятилетия своего развития прошла большой путь от ламповой и транзисторной навесной техники до применения интегральных схем. Это развитие привело к унификации источников питания и требований к входным и выходным параметрам преобразователей сигналов, что облегчает их стыковку и согласование их функционирования. Сюда относятся диапазоны изменения входных и выходных напряжений и токов, а также входные и выходные сопротивления. Подобная унификация затрагивает как аналоговую технику, так и дискретную логическую, поскольку во многих практических случаях элементы такой техники тесно взаимодействуют друг с другом в рамках одной системы управления.

Операционные усилители, нашли наибольшее распространение для усиления как аналоговых, так и АМ-сигналов. На подобных усилителях строят различные корректирующие фильтры с определенными передаточными функциями. Помимо этого, далее речь пойдет об основных логических схемах, составляющих основу большой номенклатуры сложных дискретных элементов, используемых в системах управления.

#### **Операционные усилители**

Основу операционного усилителя составляет дифференциальный усилитель постоянного тока с большим коэффициентом передачи, охваченный глубокой отрицательной обратной связью через комплексное сопротивление  $Z_0$ , и двумя входами, на которые поступают входные сигналы. Общий вид операционного усилителя показан на рис. 5.6. Входной сигнал  $X$  {поступает на первый, инвертирующий вход усилителя, отмеченный на схеме кружком, через комплексное сопротивление  $Z_1$ . Инвертирующий вход усиливает и передает сигнал на выход  $3$  с изменением полярности. Второй вход неинвертирующий.

Питание операционного усилителя осуществляется от двух стабилизированных источников постоянного напряжения  $E$  разной полярности.

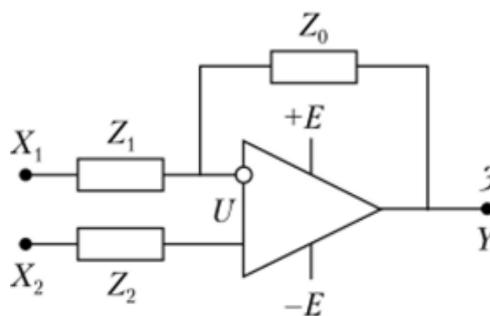


Рисунок 5.6 Общий вид схемы операционного усилителя

В качестве примера приведем основные параметры распространенного операционного усилителя первых отечественных разработок К140УД7 (более позднее название — КТ140УД708):

- напряжение питания (номинальное) —  $\pm 15$  В;
- коэффициент усиления — 30 000;
- ток нагрузки — не более 1,8 мА;
- сопротивление нагрузки — не менее 2 кОм;
- входное сопротивление — не менее 0,4 МОм;
- полоса пропускания — до 1 МГц.

Наличие большого коэффициента передачи  $K$  самого усилителя относительно высокого входного сопротивления и малого выходного сопротивления позволяет просто реализовать требуемую передаточную функцию операционного усилителя путем подбора пассивных элементов  $Z$ , в прямой и  $Z_0$  в обратной связи.

Обратная связь операционного усилителя через  $Z_0$  действует параллельно с входным сигналом и приводит к складыванию токов, порождаемых источниками входного и выходного сигналов. Каждый ток, используя принцип суперпозиции, можно оценивать отдельно. Пусть неинвертирующий вход рассматриваемого усилителя будет заземлен, т.е.  $X_2 = 0$ .

Наиболее распространенные схемы на операционных усилителях и соответствующие им передаточные функции показаны в табл. 5.1.

Таблица 5.1 - Наиболее распространенные схемы на операционных усилителях

Номер схемы	Схема	Передаточная функция
1		Пропорциональный усилитель $W(p) = K; K = \frac{R_0}{R_1}$
2		Интегратор $W(p) = \frac{K}{p}; K = \frac{1}{C_0 R_1}$
3		Инерционный усилитель $W(p) = \frac{K}{Tp + 1}; K = \frac{R_0}{R_1}; T = C_0 R_0$
4		Интегро-дифференцирующий усилитель $W(p) = \frac{K(T_1 p + 1)}{T_0 p + 1}; K = \frac{R_0}{R_1};$ $T_1 = C_1 R_1; T_0 = C_0 R_0$
5		Дифференцирующий усилитель 1 $W(p) = \frac{Kp}{T_0 p + 1}; K = C_1 R_0; T_0 = C_0 R_0$
6		Дифференцирующий усилитель 2 $W(p) = \frac{Kp}{T_0 p + 1}; K = C_1 R_0; T_0 = C_1 R_1$

В представленной таблице не приводится схема дифференцирующих усилителей без  $R_0$  в первой схеме и без  $R_t$  во второй, которые встречаются в отдельных изданиях. Это объясняется тем, что применение подобных дифференциаторов на практике приводит большому усилению высокочастотных помех в сигнале управления, которые приходится ослаблять постановкой дополнительных инерционных усилителей (фильтров).

### Цифровая электроника

Дискретные и цифровые виды сигналов, о которых шла речь в п. 4.1, находят широкое распространение в системах автоматизации и САУ. В первую очередь речь идет о верхних уровнях управления систем автоматизации и SCADA-систем, которые в общем виде рассмотрены в гл. 1. Кроме того, САУ нижнего уровня, управляемые по каналам связи от задающих микропроцессорных устройств верхнего уровня, также относятся к разряду цифровых систем, поскольку в них присутствует преобразование сигналов из дискретной формы в аналоговую и обратно.

Также в структурах САУ часто используются микропроцессорные регуляторы, осуществляющие реализацию дискретных управляющих ПИД алгоритмов (пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы). В практике построения САУ встречаются самонастраивающиеся и адаптивные регуляторы на базе микропроцессоров. Все устройства дискретной техники в основе своей содержат ряд базовых элементов, к которым можно отнести:

- электронные ключи и на их основе мультиплексоры и демультимплексоры;
- основные логические элементы: схемы НЕ, ИЛИ, И;
- компараторы;
- триггеры и на их основе счетчики, элементы памяти.

Электронные ключи чаще всего реализуются на транзисторах в ключевом режиме. Схема простейшего варианта подобного ключа показана на рис. 5.7, а. Подаваемые на базу транзистора прямоугольные импульсы отрицательной полярности (для р-77-р-транзистора) переводят транзисторный ключ из закрытого состояния в открытое. Если отрицательному значению входного импульса соответствовала логическая единица, то такой логической единицей этого ключа будет наличие коллекторного тока открытого транзистора. Высокому потенциалу на базе транзистора (логический ноль) соответствует отсутствие (точнее, малая величина) коллекторного тока через закрытый транзистор.

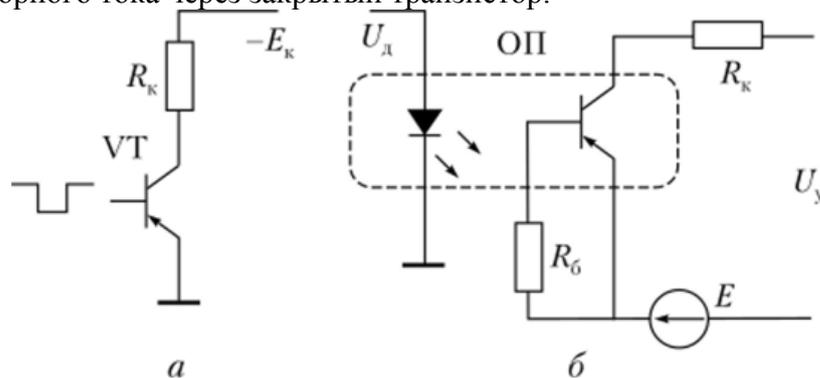


Рисунок 5.7. Электронные ключи:

а — транзистор в ключевом режиме; б — оптопара (оптрон)

Кроме такого простого ключа, распространение находят ключи на базе оптопар (оптронов). Схема такого ключа показана на рис. 5.7, б. Здесь в одном корпусе располагаются светодиод и фототранзистор, который открывается световым потоком при прохождении тока через светодиод. Вместе с резисторами и источником напряжения  $E$ , показанными на рисунке, оптрон формирует напряжение управления  $U_v$  в базовой управляющей цепи силового транзистора.

Достоинством электронных ключей на основе оптопар является отсутствие гальванической связи между схемой, формирующей дискретные сигналы управления ключами, и си-

ловыми схемами, что повышает надежность работы таких устройств.

Адресное подключение разных входных линий к одной выходной осуществляет мультиплексор, который строится на базе электронных ключей. Обратную задачу решает демультиплексор.

Основные логические элементы и компаратор составляют основу структурных построений большинства интегральных схем и блоков цифровой техники. К ним относятся схемы НЕ, ИЛИ и И. Их схематичное изображение представлено соответственно на рис. 5.8, а, б и в.

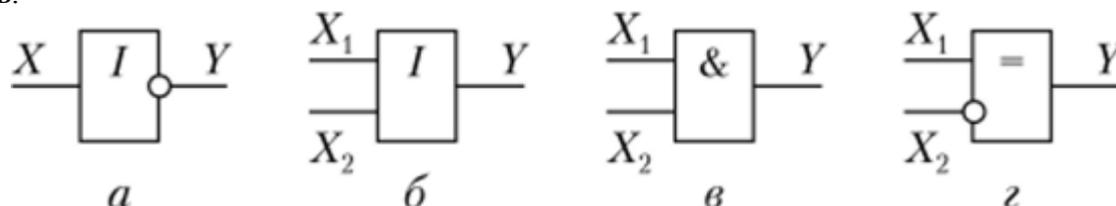


Рисунок 5.8. Основные логические элементы:

а — схема НЕ; б — схема ИЛИ; в — схема И; г — компаратор

Отметим в качестве примера, что показанный на рис. 5.7, а транзисторный ключ может быть использован как логический блок НЕ, если в качестве выходного сигнала рассматривать изменение напряжения на его коллекторе. В практике построения автоматизированных систем широко применяют интегральные микросхемы серии К155 и более поздние ее модификации, в которых реализуются порядка 50 микросхем базовых элементов с различными параметрами.

Компараторы — это элементы, меняющие свое состояние с «1» на «0» и обратно в зависимости от соотношений величин абсолютных значений входных сигналов, поступающих на их инвертирующий и неинвертирующий входы. Схематично компаратор изображен на рис. 5.7, г. Его основу составляет операционный усилитель без введения отрицательной обратной связи. Для его функционирования достаточно однополярного источника питания. Состояние компаратора (логический «0» или логическая «1») будет зависеть от знака разности входных сигналов.

### Микропроцессорные регуляторы автоматических систем и систем автоматического управления

Развитие цифровой электроники, создание ЭВМ, способных решать задачи управления в реальном времени, разнообразие надежных способов передачи данных — все это послужило основой к применению микропроцессорных средств в САУ. Сейчас уже сложно представить технологическое производство без применения микропроцессорных средств сбора, анализа, передачи данных и выработки управляющих сигналов. Применение микропроцессорных средств породило новые типы СА и САУ, в которых сравнением входных и выходных сигналов и выработкой управляющего воздействия занимается одно устройство — программируемый контроллер. Такие устройства обладают модульной структурой, которая позволяет:

- обрабатывать информацию с датчиков, сравнивать ее с уставкой, задаваемой внешним устройством или запрограммированной в самом контроллере;
- вырабатывать, согласно запрограммированным законам регулирования, управляющее воздействие на объект управления;
- передавать данные другим контроллерам.

На данный момент можно выделить три типа микропроцессорных устройств, применяемых в задачах управления и автоматизации:

- 1) промышленные компьютеры (ЭВМ);
- 2) промышленные контроллеры (ПК);
- 3) программируемые логические контроллеры (ПЛК).

Промышленные компьютеры по своему наполнению полностью схожи со стандартными IBM-совместимыми компьютерами.

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) — микропроцессорные системы, ориентированные для реализации алгоритмов логического управления, имеют модульную структуру — процессорный модуль, модуль ввода/вывода, модуль связи.

Промышленные контроллеры (ПК) — микропроцессорные системы, ориентированные на локальное управление объектом. Так же, как и ПЛК, промышленные контроллеры имеют модульную структуру.

Промышленные контроллеры можно разделить на три категории: промышленные контроллеры общего назначения (универсальные средства промышленной автоматики), проблемно-ориентированные средства автоматики и встраиваемые в системы автоматики. Последние интегрированы с объектом управления, например, являются управляющей частью станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Первые две категории конструктивно выполняются в отдельных, закрытых корпусах, имеющих устройство формирования управляющих воздействий на объект управления (устройство сопряжения с объектом — УСО).

Проблемно-ориентированные промышленные контроллеры предназначены для работы в составе СА и САУ определенными видами выходных параметров управляемого объекта, например: управление частотой вращения синхронного генератора, управление угловым положением некоторого объекта, управление температурой внутри нагревательной печи и т.п. Поэтому ПК в своем составе имеют различные специфические устройства сопряжения с объектом, которые преобразуют управляющий сигнал, вырабатываемый контроллером, в сигнал, непосредственно управляющий объектом.

Примером эффективного использования проблемно-ориентированных ПК могут служить микропроцессорные системы в составе замкнутых частотно-управляемых электроприводов с синхронными и асинхронными исполнительными двигателями. Долгое время в системах управления движением применялись в основном двигатели постоянного тока. Это было связано с тем, что изменения скорости вращения двигателя достаточно просто было добиться изменением напряжения в якорной цепи двигателя. В качестве управляющих устройств использовались магнитные и электро-машинные усилители, тиристорные и транзисторные регуляторы. В качестве систем обратной связи по скорости применялись в основном маломощные электрические генераторы (тахогенераторы).

Развитие микропроцессорной техники привело к тому, что в современных СА и САУ блок управления заменяется на микропроцессорное устройство, способное принимать и обрабатывать сигналы с датчиков привода и вырабатывать управляющее воздействие нужной формы на привод. В подобных СА и САУ используется широкая номенклатура частотных преобразователей (инверторов, сервопреобразователей) со встроенными управляющими микропроцессорами, которые подбираются под конкретную мощность исполнительного двигателя. Сами эти преобразователи часто управляются от отдельного универсального ПК. Замкнутая САУ для управления двигателем называется сервосистемой, или сервоприводом. Выпускаются также микропроцессорные системы, в которых совмещены вместе функции частотного преобразователя и устройства, формирующего сигнал управления, т.е. функции формирования сигнала рассогласования и дальнейшего преобразования сигнала (например, реализация ПИД-закона регулирования).

Классическая сервосистема представляет собой любой тип механического привода, имеющий в составе датчик (положения, скорости) и блок управления приводом (электронную схему), автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике (и соответственно на сравнивающем устройстве) согласно заданному внешнему значению (уставке). Таким образом, сервосистема — это САУ с управлением через обратную связь, позволяющая точно управлять параметрами движения (скоростью, угловым положением).

К сервоприводам как к категории приводов относится множество различных регуляторов и усилителей с обратной связью, например гидро-, электро-, пневмоусилители ручного привода управляющих элементов. Однако термин «сервопривод» чаще всего используется для обозначения электрического привода с обратной связью по положению, применяемого в автоматических системах для привода управляющих элементов и рабочих органов объектов

автоматизации.

На рис. 5.9 представлена обобщенная функциональная схема сервосистемы на базе ПК, в которой реализуются все вышеперечисленные функции, включая обработку сигнала энкодера, содержащую информацию о частоте вращения вала двигателя и о его угловом положении. Применение энкодера в сочетании с микропроцессорной обработкой его сигнала увеличивает



Рисунок 5.9. Обобщенная функциональная схема сервосистемы точность всей системы по сравнению с САУ, в которой используются аналоговые датчики.

Блок-схема ПК рассматриваемой сервосистемы с микропроцессорным управлением представлена на рис. 5.10. На схеме показаны замкнутые контуры управления по положению и скорости.



Рисунок 5.10 Блок-схема сервопривода с микропроцессорным управлением

Сервопреобразователи имеют необходимые коммуникационные интерфейсы для связи с другими контроллерами (контроллерами верхнего уровня) и интерфейс соединения с ПК, через который возможно управление сервопреобразователем со стороны оператора.

Сервопреобразователь может программироваться на различные режимы работы, такие как:

- внешнее и внутреннее управление положением (позиционный режим — движение по заданной траектории с заданными параметрами);
- внешнее и внутреннее управление скоростью вращения;
- внешнее и внутреннее управление моментом;
- комбинация перечисленных выше режимов.

Для реализации перечисленных режимов в сервопреобразователях запрограммированы законы регулирования (П, ПИ и ПИД), и фактически они становятся программируемыми регуляторами с возможностью управления электронными компонентами частотных преобразователей.

## **Тема 6. Аппаратно-программные средства автоматизации**

### **Средства управления объектом автоматизации**

Основное средство управления в автоматизированных системах — ЭВМ. Все ЭВМ, применяемые для управления компонентами автоматизированной системы управления (АСУ), можно разделить на два вида — универсальные и специализированные. В данной главе рассматриваются вопросы применения универсальных ЭВМ в составе АСУ.

*Универсальные ЭВМ* не предназначены специально для построения автоматизированных систем и в разной степени пригодны для этих целей. Однако не существует непреодолимых технических трудностей для использования любой ЭВМ в составе автоматизированной системы.

### **Выбор электронно-вычислительной машины для построения автоматизированной системы управления**

Перечислим основные критерии выбора ЭВМ:

- 1) гибкость взаимодействия с нестандартными внешними устройствами (ВУ), т.е. с измерительной и управляющей аппаратурой АСУ;
- 2) соответствие вычислительной мощности ЭВМ и требуемой скорости обработки информации в ходе эксперимента;
- 3) наличие необходимого объема запоминающих устройств для накопления и оперативной обработки данных.

Оказывается, что архитектурная организация современных ЭВМ допускает сравнительно простую возможность их взаимодействия с большим количеством ВУ (в том числе и с нестандартными). Основные тенденции развития современных ЭВМ связаны с увеличением быстродействия и расширением объемов оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), что также все в большей степени удовлетворяет соответствующим критериям их выбора. Характерная особенность современных ЭВМ заключается в том, что они образуют программно совместимые семейства.

Модели внутри семейства различаются по быстродействию, по объему памяти и другим возможностям, предоставляемым пользователю. Объединяет модели одного семейства то, что программа, написанная для одной из моделей семейства, может быть выполнена и на другой модели того же семейства. Внутри семейства модели, как правило, совместимы снизу вверх, т.е. программа, написанная для модели, обладающей меньшими возможностями, может быть без изменений выполнена на модели с большими возможностями, но не наоборот.

Основная причина появления семейств ЭВМ связана с сохранением преемственности ПО. На разработку программного ПО тратятся средства большие, чем на разработку самой ЭВМ. Другая причина заключается в том, что на базе ЭВМ одного семейства значительно проще организовать многомашинные комплексы, т.е. иерархические структуры АСУ. Наиболее распространенными представителями семейств ЭВМ в автоматизированных системах в настоящее время являются семейства, совместимые с ЭВМ:

- *IBM PC* на процессорах фирмы *Intel*;
- *Macintosh* (фирмы *Apple*) на процессорах фирмы *Motorola*.

Каждое семейство представлено машинами, различающимися быстродействием и объемом ОЗУ в сотни раз относительно базового решения.

Работу ЭВМ будем рассматривать на трех уровнях. Нижний уровень составляют технические или аппаратные средства, т.е. электронные элементы, из которых состоит ЭВМ. Эти сведения необходимы для построения АСУ на основе данной ЭВМ. Без некоторых аппаратных компонентов ЭВМ невозможно построить ни одну современную АСУ (таймер, контроллеры прямого доступа к памяти ЭВМ, контроллеры прерываний).

Средний уровень — архитектура ЭВМ отражает доступные пользователю элементы ЭВМ:

- 1) набор регистров центрального процессора (ЦП);
- 2) адресное пространство;
- 3) система команд;

- 4) способы представления информации;
- 5) способы подключения ВУ.

Разработка аппаратного и программного обеспечения автоматизированной системы требует знания архитектурных возможностей ЭВМ. Архитектурные возможности ЭВМ помогают понять, каким образом объединяются ее отдельные компоненты в единую систему, сколько ВУ можно к ней подключить и каким образом.

Верхний уровень — ПО, разделяется на системное и прикладное ПО.

Все сказанное относится в первую очередь к универсальным ЭВМ. Универсальные ЭВМ в ряде случаев обладают значительной избыточностью аппаратных и программных средств для решения типовых задач автоматизированной системы.

Другой вид средств управления в АСУ — специализированные программируемые устройства (СПУ) или программируемые логические контроллеры (ПЛК — PLC), которые в ряде случаев обладают определенными преимуществами:

- по экономичности (нет ничего лишнего);
- быстродействию (система команд ориентирована на определенный круг задач);
- надежности при работе в экспедиционных условиях.

Обычно рассматривают аппаратную и программную надежность ПЛК. Под аппаратной надежностью понимается способность аппаратуры устойчиво функционировать в условиях окружающей среды и противостоять ее вредному воздействию.

Под *программной надежностью* понимается способность ПО устойчиво функционировать при возникновении ситуаций, требующих реакции в заданное время. Программная надежность определяется, прежде всего, степенью отлаженности программного обеспечения. *Аппаратная надежность* ПЛК обеспечивается тщательной герметизацией и вентиляцией компонентов АСУ.

В связи с бурным ростом производства миниатюрных *IBM PC*-совместимых компьютеров последние все чаще стали использовать в качестве ПЛК в промышленности и научных исследованиях. Первое преимущество *IBM PC*-совместимых контроллеров связано с их открытостью, т.е. возможностью применять в автоматизированных системах современное оборудование, появляющееся на мировом рынке. Второе преимущество *IBM PC*-совместимых контроллеров заключается в их «родственности» с компьютерами верхнего уровня. Это приводит к снижению затрат на создание и модернизацию АСУ. Третье преимущество *IBM PC*-совместимых контроллеров — их более высокая надежность.

Как правило, ПЛК содержат все основные компоненты, входящие в состав ЭВМ: ЦП, ОЗУ, ПЗУ, интерфейс для связи с объектом и некоторыми стандартными периферийными устройствами. Все задачи реального времени в таких системах решаются аналогично задачам, решаемым автоматизированными системами на основе универсальных ЭВМ. Программное обеспечение в простейшем случае хранится в ПЗУ или загружается из сети.

Во многих случаях целесообразно использовать ПЛК в качестве компонент объектно-ориентированных АС для сбора и предварительной обработки информации.

### **Архитектурные возможности электронно-вычислительных машин в автоматизированных системах**

В составе ЭВМ можно выделить следующие основные элементы архитектуры:

- 1) центральный процессор (ЦП);
- 2) основную память;
- 3) каналы ввода-вывода информации.

#### **Центральный процессор**

Центральный процессор в автоматизированных системах используется для обработки данных, управления ходом вычислительного процесса, а также управления аппаратурой АС. Для программиста (пользователя) ЦП - набор программно доступных регистров и система команд. При реализации отдельных методов обмена данными программист вынужден взаимодействовать непосредственно с некоторыми регистрами процессора.

Основные регистры процессора. *Счетчик команд* (СчК), или программный счетчик,

всегда содержит адрес следующей выполняемой ЦП команды. При обычном выполнении программы в процессе выполнения очередной команды его содержимое инкрементируется на единицу. При изменении последовательности выполнения программы (например, запросами на обслуживание от ВУ) в СчК записывается адрес команды, на которую должен перейти процесс выполнения программы.

*Указатель стека (УС)* хранит адрес последней запятой ячейки стековой памяти. Во многих ситуациях в программе требуется временно запомнить информацию, а затем считать ее в обратном порядке. Эта проблема решается посредством реализации стека LIFO (Last in First out — «последним прибыл — первым обслужен»). Стек всегда растет в сторону младших адресов. При включении элементов в стек производится автоматический декремент регистра УС, а при их извлечении — инкремент УС. Можно организовать стек типа FIFO (First in First out — «первый пришел — первый обслужен»).

*Регистр состояния процессора (РСП — PSW (Processor Status Word))*, или регистр флагов (Flags) содержит признаки выполнения арифметических и логических операций в арифметико-логическом устройстве (АЛУ) и управляет обслуживанием запросов на обслуживание от ВУ. По существу РСП представляет собой набор триггеров.

### Основная память

Главным признаком, по которому можно отличить основную память от других видов памяти, является возможность произвольного считывания ее ячеек и время обращения к любой ячейке основной памяти одинаково. В качестве основной памяти применяют ОЗУ и ПЗУ. ОЗУ используется для хранения команд и данных, изменяющихся в процессе работы системы. В ПЗУ хранятся загрузчики операционной системы (ОС), тестовые программы, драйверы стандартных ВУ.

### Каналы ввода-вывода информации

Каналы ввода-вывода информации служат для передачи данных между ЦП, ОЗУ и ВУ — средство взаимодействия ЭВМ с внешним миром. По способу соединения между собой ЦП, основной памяти и внешних устройств архитектуры ЭВМ можно разделить на два вида.

1. ЭВМ с общим магистральным каналом обмена данными (рис. 6.1).



Рисунок 6.1. Функциональная схема соединения компонентов в ЭВМ на основе общего магистрального канала

*Магистральный канал* — пассивный многопроводный канал связи, по которому передаются сигналы разного функционального назначения. Набор проводников, по которым передаются сигналы одного функционального назначения, называется *шиной*. Различают шину данных (ШД), шину адресов (ША) и шину управления (ШУ).

Для соединения ЦП, основной памяти и ВУ используется одна совокупность шин, называемая общим магистральным каналом. Основные черты архитектуры па основе единого магистрального канала:

- все устройства подключаются к магистрали одинаково — единый интерфейс;
- имеется одно адресное пространство для основной памяти и ВУ;
- определенная часть из общего количества возможных адресов зарезервирована для регистров ВУ и ПЗУ;
- оставшаяся часть адресов используется ОЗУ;
- 8 Кбайт или 4 К 16-разрядных слов отведены для регистров ВУ;
- для обращения к ВУ используются те же команды, что и для обращения к памяти;
- ВУ имеют возможность обмена данными с любым регистром ЦП.

2. ЭВМ с изолированными магистралями (с двумя магистральными каналами обмена

данными) (рис. 6.2).

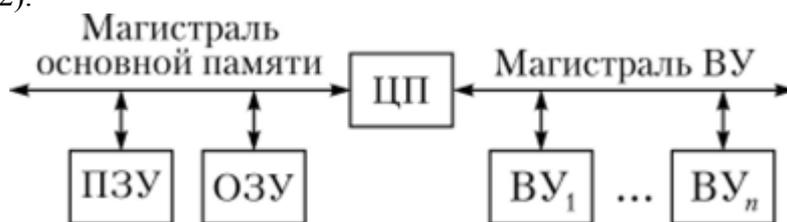


Рисунок 6.2. Функциональная схема соединения компонентов в ЭВМ на основе архитектуры с изолированными магистральными каналами

Основные черты архитектуры на основе изолированных магистральных каналов:

- с функциональной точки зрения здесь имеются два тракта передачи кодов: ЦП ОЗУ, ПЗУ и ЦП ~ ВУ;
- есть две изолированные области адресов — область адресов основной памяти и область адресов ВУ;
- обращение к каждой из областей осуществляется различными группами команд;
- более простой, чем в предыдущем случае, интерфейс для ВУ.

### Типовые сигналы шины управления

Управляющие сигналы определяют направление передачи данных по отношению к ЦП и служат для инициирования различных способов обмена данными (табл. 6.1).

Таблица 6.1 - Типовые сигналы ШУ для обмена данными по магистрали ЭВМ

Наименование сигнала	Направление передачи по отношению к ЦП	Архитектура	Назначение сигнала
Чтение	Вывод	1,2	Считывает в регистр ЦП одноразрядное слово по указанному адресу из ячейки ОЗУ (1,2) или регистра ВУ (1). В двухшинных архитектурах эти сигналы различны
Ввод	-//-	2	Считывает в регистр ЦП одноразрядное слово по указанному адресу из регистра ВУ
Запись	Вывод	1,2	Записывает в ячейку ОЗУ (1,2) или регистр ВУ(1) по указанному адресу одноразрядное слово из регистра ЦП. В двухшинных архитектурах эти сигналы различны
Вывод		2	Записывает в регистр ВУ одноразрядное слово из регистра ЦП по указанному адресу
Запрос прерывания (ЗП)	Ввод	1,2	Требование ВУ прерывания текущей программы ЦП и его приоритетное обслуживание
Разрешение прерывания (РП)	Вывод	1,2	ЦП разрешает ВУ прерывание текущей программы для выполнения операций по его обслуживанию
Запрос шины (ЗШ)	Ввод	1,2	Требование ВУ к ЦП освободить магистраль и предоставить ВУ возможность обмена данными с ОЗУ, минуя ЦП
Разрешение шины (РШ)	Вывод	1,2	ЦП удовлетворяет требование ВУ и отключается от шин магистрали

При обмене данными на магистрали всегда действуют два устройства:

- 1) задатчик, или ведущий;
- 2) исполнитель, или ведомый.

Задатчиком, как правило, является ЦП, а исполнителем — ячейка ОЗУ или регистр ВУ. Задатчик всегда управляет ША и ШУ. Исполнитель реагирует на адресные и управляющие сигналы задатчика и может выставлять или принимать данные с ШД. Действия процессора по передаче одного слова (байта) по системной шине называются *циклом шины*.

### Принципы организации обмена данными между электронно-вычислительной машиной и внешними устройствами

Под ВУ будем иметь в виду стандартные периферийные устройства ЭВМ, или устройства управления объектом автоматизации (т.е. У СО), подключаемые пользователем. Чтобы управлять объектом автоматизации (ОА) или измерять параметры О А, необходимо передавать У СО информацию или принимать из У СО информацию. Иными словами, обмениваться данными между ЦП, аппаратурой У СО и ОЗУ. Известны два возможных режима обмена данными между ЭВМ и ВУ:

- программно-управляемая передача данных;
- непосредственный (прямой) доступ ВУ к оперативной памяти ЭВМ.

Программно-управляемая передача осуществляется пословно, под управлением процессора. Передача данных из ВУ в оперативную память ЭВМ выполняется следующей последовательностью шагов ЦП и ВУ (рис. 6.3):

- 1) ВУ подготавливает слово (байт) данных и по команде ЦП либо с помощью своих аппаратных средств помещает их в интерфейс ввода устройства;
- 2) ЦП считывает данные из интерфейса в один из своих внутренних регистров;
- 3) ЦП пересылает данные из регистра в ячейку ОЗУ по указанному в программе адресу.

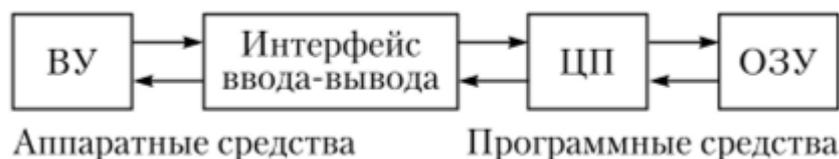


Рисунок 6.3. Последовательность операций программно-управляемого обмена данными

Передача слова (байта) данных из оперативной памяти к ВУ выполняется той же последовательностью операций, выполняемой в обратном порядке:

- 1) ЦП считывает слово данных из ячейки ОЗУ в один из своих внутренних регистров;
- 2) ЦП пересылает слово данных из внутреннего регистра ЦП в интерфейс вывода;
- 3) ВУ по команде ЦП либо с помощью своих аппаратных средств считывает данные из интерфейса.

Передача данных в режиме прямого доступа ВУ к оперативной памяти ЭВМ (ПДП) осуществляется также пословно под управлением аппаратных средств, называемых контроллером ПДП, минуя ЦП. Процессор в обмене данными участия не принимает. Скорость передачи при этом существенно возрастает (в 10 раз и более).

Режим ПДП обмена применяется, когда программа обмена занимает времени больше, чем это допустимо, или, например, при передаче больших массивов данных.

Передача данных в режиме ПДП из ВУ в память ЭВМ выполняется следующей последовательностью шагов (см. рис. 5.4):

- 1) ВУ подготавливает данные и помещает их в интерфейс ввода канала ПДП;
- 2) контроллер ПДП (КПДП) передает данные из интерфейса ПДП в ячейку ОЗУ.

Передача слова (байта) данных из оперативной памяти к ВУ выполняется той же последовательностью операций, выполняемой в обратном порядке:

- 1) КПДП выбирает данные из ячейки ОЗУ и помещает их в интерфейс канала ПДП;
- 2) ВУ считывает данные из регистра интерфейса.



Рисунок 6.4. Последовательность операций обмена данными в режиме ПДП

Основное различие рассмотренных режимов обмена данными заключается в способе управления обменом:

- в режиме программно-управляемого обмена, передачей данных управляет ЦП, выполняющий специальную программу обмена данными;
- в режиме ПДП, передачей управляет контроллер ПДП (КПДП), т.е. аппаратные средства УСО.

В любом режиме передача выполняется через интерфейс ВУ.

Интерфейс при обмене данными выполняет следующие функции:

- буферное хранение (в ряде случаев преобразование) данных;
- устранение временных различий в работе ВУ и ЦП или КПДП;
- передача информации о состоянии ВУ в ЦП или КПДП;
- передача приказов от ЦП или КПДП к ВУ.

### Основные методы программно управляемой передачи данных

Известны три метода программно-управляемой передачи данных:

- 1) безусловный обмен;
- 2) обмен данными по готовности ВУ;
- 3) обмен с прерыванием текущей программы ЦП.

В различных ситуациях, возникающих при работе АС, применяется тот или иной метод. Рассмотрим все методы программно-управляемого обмена в следующей последовательности:

- 1) алгоритм обмена;
- 2) функциональная схема интерфейса;
- 3) техническая реализация интерфейса (на конкретном примере);
- 4) программная реализация алгоритма обмена;
- 5) пример программирования.

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ (УКАЗАНИЯ) К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ

Выполнение лабораторной работы следует начать с изучения теоретических сведений. Далее необходимо ознакомиться с заданием практической части и выполнить его.

Лабораторная работа считается выполненной, если предоставлен отчет о результатах выполнения задания; проведена защита проделанной работы.

Защита проводится в два этапа:

- демонстрируются результаты выполнения практического задания.
- ответить на ряд вопросов из перечня контрольных вопросов, который приводится в задании на лабораторную работу.

Каждая лабораторная работа оценивается определенным количеством баллов в соответствии с критериями оценивания.

### Лабораторная работа № 1 Изучение системы команд и основных принципов программирования микроконтроллеров

Время выполнения – 2 часа.

Цель работы: Знакомство со средой разработки для написания и отладки программного обеспечения микроконтроллеров. Знакомство с основами языка Ассемблер изучаемого микроконтроллера. Изучение принципов программирования микроконтроллеров. Изучение

основ организации и функционирования ядра микроконтроллера.

### ***Задание к работе***

Ниже приведен возможный перечень заданий для выполнения. Конкретные параметры (адреса, количество пересылаемых байт и т.д.) получают у преподавателя индивидуально.

1 Написать программу, складывающую два числа, находящихся в памяти данных, и помещающую результат вычисления в ячейку памяти следующей за аргументами.

2 Написать программу складывающую массив чисел находящихся во внутренней памяти данных, и помещающую результат (двухбайтный) после массива.

3 Написать программу, складывающую два массива чисел, расположенных в памяти данных, и заносящую результат в третий массив.

4 Написать программу нахождения контрольной суммы содержимого памяти данных.

5 Написать программу, находящую среднее арифметическое содержимого памяти программ.

После реализации каждого пункта и демонстрации его работы преподавателю, студент получает индивидуальное задание на модификацию программ.

### ***Контрольные вопросы***

1 Опишите способы адресации AVR.

2 Особенности булева процессора AVR.

3 Назначение и примеры использования регистров.

4 Обращение к памяти данных.

5 Обращение к памяти программ.

6 Особенности выполнения команд условных переходов.

7 Особенности команд BREQ, BRNE.

8 Отличие различных команд JMP (IJMP, RJMP, JMP).

9 Команды умножения.

## **Лабораторная работа № 2 Работа с внешними устройствами**

Время выполнения – 4 часа.

Цель работы: Изучения портов ввода-вывода микроконтроллеров. Приобретения практических навыков работы с внешними устройствами.

### **Теоретические сведения**

Порты ввода-вывода являются основой любого микроконтроллера, позволяя ему общаться с внешним миром. В ATmega128A реализовано шесть восьмибитных порта ввода-вывода и один шестибитный с возможностью побитной адресации. Познакомимся вкратце с основами организации портов этого контроллера, необходимыми для выполнения данной лабораторной работы.

Во всех современных контроллерах кроме портов ввода-вывода общего назначения есть большое количество аналоговых и цифровых устройств, которым тоже необходимо обмениваться информацией с внешним миром. С целью экономии количества выводов микросхемы все эти устройства используют одни и те же выводы микроконтроллера. Чтобы не было конфликта при обращении нескольких устройств к одному выводу, выводы конфигурируют с помощью регистров конфигурации соответствующей периферии. Поэтому в один момент времени к выводу может обращаться только одно внутреннее устройство контроллера. Если регистры конфигурации выводов не программировать, то в силу вступает принцип «по умолчанию». В большинстве контроллеров, как правило, по умолчанию к выводам подключены цифровые порты ввода-вывода общего назначения настроенные на ввод. Т.е. вводить информацию в цифровом виде можно сразу после старта контроллера.

Для вывода информации уже необходимо провести определенные настройки порта. В частности, необходимо установить соответствующие биты в регистре DDRx. Более подробно о настройке портов ввода-вывода Вы можете узнать из документации на данный микроконтроллер, прилагаемой в комплекте поставки

стенда или скачанной с сайта производителя. В качестве внешних устройств на лабораторном стенде представлены:

1. Светодиоды (8 штук);
2. Восемь семисегментных индикаторов;
3. Динамическая клавиатура, состоящая из 16 клавиш, и клавиатура со сканированием через дешифратор, содержащая 12 клавиш;
4. Переменный резистор;
5. Пьезоизлучатель;
6. Шаговый двигатель;
7. Две кнопки;
8. ЖК-индикатор;
9. Энкодер;
10. Последовательные интерфейсы;
11. DIP-переключатели;

Однако, при использовании данного лабораторного стенда для изучения микроконтроллеров, необходимо учитывать определённые схемотехнические решения подключения внешних устройств.

В данном стенде подключение внешних устройств имеет классическую шинную архитектуру. К порту PA подключена шина данных. К ней также подключены входы данных всех регистров ввода-вывода. А к выходам регистров уже подключены непосредственно внешние устройства. Такая структура выбрана потому, что внешними устройствами могут управлять микроконтроллер, микропроцессор и ПЛИС.

Ниже на рисунке 6 изображена структурная схема подключения внешних устройств. В качестве источника управляющих сигналов, защелкивающих данные в соответствующий регистр, используется порт PC, биты которого подключены к входам записи регистров. Таким образом, для того, чтобы в определенное устройство ввода-вывода вывести информацию, необходимо в порт PA записать выводимый байт, а на определенном выводе порта PC сформировать положительный импульс (сначала вывести «1», потом «0»).

При этом надо учитывать, что на шине присутствуют не только устройства вывода, но и устройства ввода, которые тоже могут выставлять информацию на шину данных. Чтобы не было конфликтов на шине, необходимо управляющие сигналы устройств ввода удерживать в неактивном состоянии. Одним из таких устройств является ЖК-индикатор. Он управляется тремя старшими битами порта PD. Поэтому, чтобы он не мешал обмену, его надо отключить с помощью «0» на PD7. Другими устройствами ввода являются буферы клавиатуры и DIP-переключателей. Они соответственно управляются выводами портов PC4 и PC5. Причем данные сигналы инверсные. Поэтому, чтобы отключить буферы надо подать на эти порты «1».

Давайте рассмотрим пример простой программы, иллюстрирующей всё вышесказанное и выводящей на светодиодную линейку информацию с DIP-переключателей в бесконечном цикле:

### ***Задание к работе***

Основными устройствами в данной работе являются светодиодная линейка и DIP-переключатели. В качестве дополнительных могут быть задействованы семисегментные индикаторы, две кнопки и пьезоизлучатель.

Входе лабораторной работы нужно имитировать работу различных цифровых схем.

Возможные варианты заданий для данной лабораторной работы (конкретные детали реализации задания для каждого студента необходимо получить у преподавателя):

- Мультиплексор 4->1
- триггер 155TM2
- Двоичный реверсивный счётчик
- Сдвиговый регистр K155ИР1
- «Бегущие огни»

JK-триггер K155ТВ1  
 Шифратор-дешифратор  
 генератор звука  
 4 элемента «исключающее ИЛИ»

**Контрольные вопросы**

1. Особенности организации портов AVR.
2. Альтернативные функции портов.
3. Особенности выполнения команд по принципу «чтение-модификация-запись».
4. Работа с памятью данных и программ.
5. Организация выходов и нагрузочная способность портов AVR микроконтроллеров.
6. Модификация отдельных бит при побитном и байтовом обращении к порту.
7. Влияние параметров нагрузки на формирование выходных сигналов.

**Лабораторная работа № 3 Работа с таймером и системой прерываний**

Время выполнения – 4 часа.

*Цель работы:* Изучения таймеров и особенностей их работы. Приобретения навыков написания программ обработки прерываний.

**Теоретические сведения**

В любом современном микроконтроллере имеются контроллер прерываний и несколько таймеров. Программное формирование временных последовательностей и измерение времени имеет довольно много недостатков, поэтому в реальных системах для этих целей используют аппаратные возможности в виде таймеров счетчиков. По сути дела таймеры - это устройства, очень напоминающие секундомеры. Их можно запустить в определенный момент времени, их можно приостановить, продолжить счёт далее или сбросить в ноль. Инкрементируются таймеры в каждом машинном цикле или через кратные ему интервалы времени, когда для тактирования таймера используется делитель частоты. Максимальное значение, до которого может считать таймер, определяется его разрядностью, которая обычно составляет 8 или 16 бит. Но кроме этого таймер можно заставить инкрементироваться и импульсами, поступающими на внешний вход контроллера. Таким образом, таймер превращается в счётчик событий, которые в виде импульсов поступают на вход. Отсюда и происходит их название – таймер-счётчик (Timer/Counter). Более подробное описание реализации таймеров ATmega128A приведено ниже и может использоваться Вами как необходимая и достаточная информация для выполнения данной работы.

**Таймеры микроконтроллера ATmega128A**

МК имеет четыре таймера-счетчика (ТС): по два 8-и и 16-и разрядных. ТС могут использоваться для измерения временных интервалов, подсчета внешних событий, генерации периодических запросов прерываний, в качестве ШИМ генераторов (каналы сравнения) и для регистрации времени возникновения события (каналы захвата). Один из 8-и разрядных ТС имеет возможность асинхронного тактирования от собственного генератора, что в сочетании с часовым кварцевым резонатором позволяет использовать его в качестве часов реального времени. Шестнадцатиразрядные таймеры абсолютно идентичны, тогда как восьмиразрядные имеют некоторые отличия, связанные с тем, что ТС0 может асинхронного тактирования, а ТС2 – нет. ТС0 имеет дополнительные коэффициенты деления тактовой частоты, но не имеет возможности считать внешние события.

Таймер	Разрядность	Число каналов сравнения	Число каналов захвата	Делители тактовой частоты
0	8	1	0	1, 8, 32, 64, 128, 256, 1024
1	16	3	1	1, 8, 64, 256, 1024
2	8	1	0	1, 8, 64, 256, 1024
3	16	3	1	1, 8, 64, 256, 1024

Когда ТС функционирует как таймер, регистры ТС инкрементируются по каждому такту внутреннего сигнала тактирования ТС. Частота внутреннего сигнала тактирования ТС равна системной тактовой частоте, деленной на один из возможных делителей этого ТС. Делители выбираются в зависимости от требуемых интервалов времени. У каждого счетчика свой независимый делитель системной частоты.

Когда ТС функционирует как счетчик, регистры ТС инкрементируются под воздействием перехода из 1 в 0 или из 0 в 1 внешнего сигнала на выбранном входном выводе T1, T2 или T3. Могут подсчитываться импульсы с частотой до 1/2 системной тактовой частоты. Входной сигнал не обязательно должен быть периодическим, но для его гарантированного прочтения он должен удерживаться на заданном уровне как минимум в течение одного полного системного такта.

### Таймер-счетчик TC0

Для доступа к TC0 и управления ими используются регистры ввода-вывода. ТС реализован в виде 8-разрядных регистров счетчика TCNT0 и регистра сравнения OCR0. Регистр управления TCCR0 используется для задания режима работы, которых у TC0 четыре, выбора источника тактирования (делителя), задания режима работы выхода OCR0 и принудительного совпадения сравнения модуля генерации выходного сигнала. С помощью регистра TIFR можно узнать состояние флагов прерываний, которых у TC0 два: переполнение таймера и совпадения. Прерывания могут быть запрещены или разрешены индивидуально с помощью регистра TIMSK. Кроме этого для управления TC0 есть регистр асинхронного состояния ASSR и два бита в регистре специального назначения SFIOR. Далее кратко рассмотрим регистры управления и состояния. Более полная информация может быть получена из руководства, предоставляемого производителем МК.

### Регистр управления TCCR0

Как было отмечено выше, регистр TCCR0 предназначен для управления TC0

Бит	0	1	2	3	4	5	6	7
	FOC0	WGM00	COM01	COM00	WGM01	CS02	CS01	CS00
Чтение/запись	W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Нач. значение	0	0	0	0	0	0	0	0

**FOC0** – бит только для записи. При работе TC0 в режимах, отличных от ШИМ, используется для принудительного перевода генератора выходного сигнала в состояние, которое возникает при совпадении регистра счетчика TCNT0 и регистра сравнения OCR0.

**WGM00, WGM01** – биты задания режима работы TC0.

№	WGM01	WGM00	Режим	Считает до	Обновление OCR0	Установка переполнения
0	0	0	Обычный	0xFF	Сразу	В максимуме
1	0	1	ШИМ с точной фазовой	0xFF	В максимуме	В минимуме
2	1	0	Автоматическая перегрузка	OCR0	Сразу	В максимуме
3	1	1	Быстрый ШИМ	0xFF	В минимуме	В максимуме

**COM00, COM01** – управление режимом выхода OCR0. Поведение этого выхода зависит от режима работы TC0.

COM01	COM00	Не ШИМ	ШИМ с точной фазой	Быстрый ШИМ
0	0	Обычная работа порта, OCR0 отсоединен	Обычная работа порта, OCR0 отсоединен	Обычная работа порта OCR0 отсоединен
0	1	Изменение состояния	Зарезервирован	Зарезервирован

		выхода OCR0 при совпадении		
1	0	Вывод низкого уровня при совпадении	Сброс при совпадении, когда счетчик инкрементируется установка при совпадении, когда счетчик декрементируется	Сброс при совпадении установка в максимум
1	1	Вывод высокого уровня при совпадении	Установка при совпадении, когда счетчик инкрементируется, сброс при совпадении, когда счетчик декрементируется	Установка при совпадении, сброс в максимуме

**CS02-CS00** – биты выбора источника тактирования. С помощью этих битов можно остановить TC0 или запустить его с делением тактовой частоты на заданный коэффициент.

CS02	CS01	CS00	Описание
0	0	0	TC0 остановлен
0	0	1	Тактирование с частотой ядра
0	1	0	Тактирование с частотой ядра, деленной на 8
0	1	1	Тактирование с частотой ядра, деленной на 32
1	0	0	Тактирование с частотой ядра, деленной на 64
1	0	1	Тактирование с частотой ядра, деленной на 128
1	1	0	Тактирование с частотой ядра, деленной на 256
1	1	1	Тактирование с частотой ядра, деленной на 1024

### Регистр флагов прерываний TIFR

Бит	0	1	2	3	4	5	6	7
	OCF2	TOV2	ICF1	OCF1A	OCF1B	TOV1	OCF0	TOV0
Чтение/запись	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Нач. значение	0	0	0	0	0	0	0	0

TC0 использует два бита в регистре TIFR.

OCF0 – флаг выставляется при совпадении значений регистров TCNT0 и OCR0.

TOV0 – флаг переполнения TC0.

Флаги сбрасываются при переходе в прерывание или записью единицы в соответствующий бит регистра.

### Регистр масок TIMSK

Бит	0	1	2	3	4	5	6	7
	OCIE2	TOIE2	TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1	OCIE0	TOIE0
Чтение/запись	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Нач. значение	0	0	0	0	0	0	0	0

Аналогично регистру TIFR, в регистре масок TIMSK TC0 используется два младших бита.

OCIE0 – установкой единицы разрешается прерывание при переполнении TC0. TOIE0 – установкой единицы разрешается прерывание при совпадении значений регистров TCNT0 и OCR0.

### Таймер-счетчик TC2

TC2 аналогичен TC2 за исключением значений битов CS регистра TCCR2.

CS22	CS21	CS20	Описание
0	0	0	TC2 остановлен
0	0	1	Тактирование с частотой ядра
0	1	0	Тактирование с частотой ядра, деленной на 8
0	1	1	Тактирование с частотой ядра, деленной на 64
1	0	0	Тактирование с частотой ядра, деленной на 256
1	0	1	Тактирование с частотой ядра, деленной на 1024
1	1	0	Тактирование по спаду на входе T2
1	1	1	Тактирование по фронту на входе T2

Как видно из таблицы, у TC2 имеется возможность подсчета внешних событий подаваемых на вход T2 тогда как у TC0 есть дополнительные делители системной частоты.

### Таймеры-счетчики TC1 и TC3

TC1 и TC3 являются 16-битными, у них по три канала сравнения и один канал захвата, у них не по одному, а по три регистра управления, пятнадцать режимов работы, большее количество прерываний. Для получения полной информации о работе этих таймеров следует обратиться к документации на МК ATmega128A.

### Система прерываний

МК ATmega128A имеет в своем арсенале 35 прерываний, из которых внешние прерывания INT0 – INT7 могут быть вызваны либо уровнем, либо изменением состояния сигнала на входах МК в зависимости от значений управляющих бит в регистрах ECR A и ECR B. Флаги активности прерываний содержатся в регистре EIFR, разрешаются прерывания установкой соответствующего бита регистра EIMSK в единицу.

#### Варианты заданий к работе:

- 1 Частотомер (измерение частоты входных импульсов).
- 2 Часы (вывод секунд, минут часов в коде BCD на порты).
- ШИМ-регулятор.
- Управляемый генератор.
- Календарь.
- Трехфазный генератор.
- Программа подсчёта числа импульсов между двумя событиями.

#### Контрольные вопросы

- 1 Сравнение режимов работы таймеров.
- 2 Временные характеристики таймеров.
- 3 Работа с таймерами с помощью прерываний.
- 4 Последовательность обслуживания прерываний.
- 5 Размещение подпрограмм обслуживания прерываний в памяти в программах на ассемблере. Директива ORG.
- 6 Время реакции на запрос прерывания.
- 7 Особенности обслуживания подпрограмм обработки прерываний в отличии от обычных подпрограмм.
- 8 Управление работой таймера посредством внешних сигналов.
- 9 Тактирование последовательного порта с помощью таймера.

### Лабораторная работа № 4 Работа с клавиатурой и семисегментными индикаторами

Время выполнения – 4 часа.

*Цель работы:* Изучение принципов подключения и работы дисплея и клавиатуры с динамическим сканированием.

### Теоретические сведения

Схема подключения 7-сегментного индикатора как устройства вывода информации, удобного для восприятия, часто используется 7-сегментный индикатор. Рассмотрим подключение двухразрядного 7-сегментного индикатора. Каждый индикатор представляет собой восемь светодиодов с общим анодом: семь светодиодов для отображения сегментов цифр, а восьмой светодиод отображает десятичную точку. Внешний вид и схема 7-сегментной светодиодной матрицы представлена на рисунке. Индикатор может отображать цифры от 0 до 9, а также некоторые буквы. Буквенное обозначение сегментов и схема светодиодной матрицы представлены на рисунке.

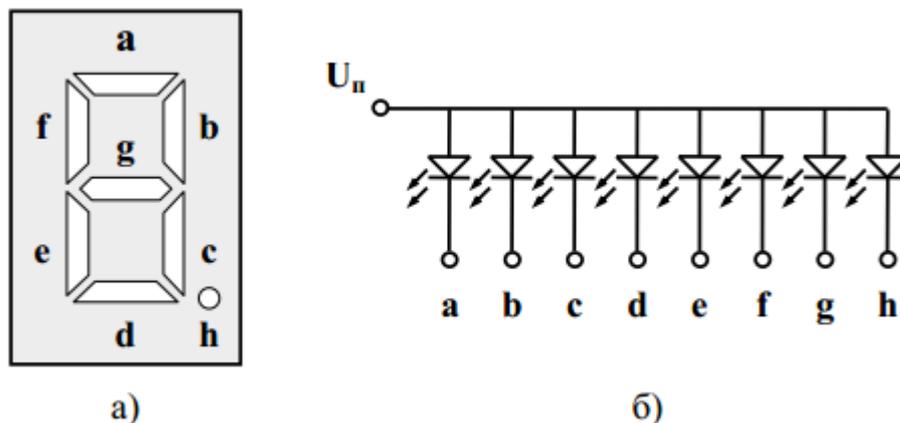


Рисунок — Внешний вид (а) и схема 7-сегментной светодиодной матрицы (б)

Общие аноды каждого разряда подключаются к выходам регистра разрядов. А выводы сегментов всех индикаторов соединённые параллельно подключаются к выходам регистра сегментов. Если вывести разрешающий сигнал на один из выходов регистра разрядов, то на аноды светодиодов соответствующего индикатора будет подано напряжение питания. Если теперь на регистр сегментов вывести определенную комбинацию 0 и 1, то в этом разряде будет светиться определенный символ. Теперь делаем определенную задержку, и повторяем описанный алгоритм для другого разряда, сменяя комбинацию 0 и 1 на регистре сегментов на соответствующую тому символу, который должен отображаться в этом разряде. Пройдя до последнего разряда, начинаем эту процедуру сначала. Таким образом, в один момент времени на индикаторах будет отображаться только один разряд. Но при достаточно большой скорости сканирования глаза не будут замечать мерцания и будет воспринимать изображение как статическое. Частота, при которой изображение перестает «мерцать», равна 50 Герцам. Поэтому сканирование всех индикаторов должно происходить за время менее 20 мс.

Теперь рассмотрим принцип динамического сканирования клавиатуры.

Пример подключения клавиатуры по этому принципу показан на рисунке 7. Кнопки в такой клавиатуре организованы в виде матрицы. Одним выводом кнопки подключены к «столбцам», другим выводом к «строкам». «Строки» подключаются к выходам регистра сканирования. «Столбцы» подключаются ко входам регистра «возвратных линий». На одну из строк выставляется 1. После чего считывается состояние регистра возвратных линий. Если во всех столбцах считаны 0, то мы смещаем выставленную 1 на следующую строку, и повторяем опрос столбцов. Дойдя до последней строки, начинаем всё сначала. Если при очередном считывании, мы обнаружим на одном из столбцов 1, то значит мы зарегистрировали факт нажатия клавиши. Произведение номера сканируемой строки на номер столбца, в котором обнаружена 1, и будет номером нажатой клавиши. Сканирование всей клавиатуры необходимо осуществлять с периодом примерно 5 мс., чтобы не «проморгать» факт нажатия клавиши. Также необходимо помнить о «дребезге контактов».

### Варианты заданий к работе:

1 Часы.

- 2 Конвертер DEC-> HEX.
- 3 Бегущая цифровая строка.
- 4 Простой калькулятор.
- 5 Таймер.
- 6 Измеритель длительности импульса

#### **Контрольные вопросы**

1. Способы вычисления номера нажатой клавиши.
2. Способы подавлениядребезга кнопок.
3. Требования к временным интервалам динамического сканирования клавиатуры и дисплея.
4. Использование табличного вычисления функций при работе с клавиатурой и семи-сегментным дисплеем.
5. Различные способы преобразования  $BIN \Rightarrow BCD$ .
6. Вывод на индикаторы вещественных чисел.
7. Программная регулировка яркости семисегментных индикаторов.

### **Лабораторная работа № 5 Исследование работы триггеров**

Время выполнения – 2 часа.

*Цель работы:* Ознакомиться с назначением и принципом действия триггеров. Ознакомиться с практическими схемами RS, D триггеров и исследовать их.

#### **Общие сведения**

Триггер - электронная схема с двумя устойчивыми состояниями. Схема триггера на электронных лампах была предложена в 1918 году русским учёным М.А.Бонч-Бруевичем. Одно состояние триггера принимается за нулевое, другое состояние принимается за единичное.

Термин триггер происходит от английского слова trigger - защёлка, спусковой крючок. Для обозначения этой схемы в английском языке чаще употребляется термин flip-flop, что в переводе означает “хлопанье”. Это звукоподражательное название электронной схемы указывает на её способность почти мгновенно переходить (“перебрасываться”) из одного электрического состояния в другое и наоборот.

Обычно триггер строится на основе двух инверторов, выход одного из которых считается прямым выходом триггера, а выход другого инвертора считается инверсным. Состояние прямого выхода определяет состояние триггера. Символом триггера на схемах является буква Т.

Поведение триггера описывается матрицей или таблицей переходов. Различают полную и сокращенную таблицу переходов. В полной таблице переходов определяется последующее состояние триггера  $Q(t+1)$  в зависимости от состояний входных информационных сигналов и предыдущего состояния триггера:

$$Q(t+1) = f(Q(t), x_i(t)).$$

Сокращенная таблица переходов не принимает в расчёт предыдущее состояние триггера, поскольку поведение триггера полностью определяется состоянием входных сигналов. У триггера различают информационные входы и входы синхронизации, помечаемые символом С (от слова Clock). По каждому входу определяют понятие активного сигнала. Активным сигналом может быть уровень (ноль или единица) или фронт сигнала (нарастающий или спадающий). Активный сигнал определяет поведение триггера в следующий момент времени. Если триггер не имеет входов синхронизации, то его называют асинхронным.

этом случае его поведение однозначно определяется в момент прихода активного сигнала по информационному входу. В зависимости от условного обозначения входа триггер будет изменять своё состояние или под действием уровня входного сигнала или под действием фронта этого сигнала. Информационные входы имеют буквенные идентификаторы, которые соответствуют их назначению.

Если триггер имеет хотя бы один вход синхронизации, то он считается синхронным.

У такого триггера имеются информационные входы, приём информации по которым происходит в момент активного синхросигнала. Независимо от этих входов триггер может иметь и другие информационные входы, которые асинхронно или синхронно определяют поведение триггера.

В зависимости от того, какой сигнал является активным по входу синхронизации, различают триггеры потенциальные (со статическим управлением) или управляемые по уровню и триггеры с динамическим управлением или срабатывающие по фронту.

В некоторых триггерах под действием определённой комбинации информационных сигналов на прямом и инверсном выходах наблюдаются одинаковые состояния сигналов. В этом случае нарушается логика работы триггера. Такое состояние триггера называется запрещённым и соответствующая комбинация входных сигналов запрещена. При построении временных диаграмм, если поведение триггера анализируется по его условному обозначению, запрещённое состояние триггера можно не изображать или выделять каким-либо способом. Если схема триггера представлена на логических элементах, то временные диаграммы могут быть построены для выходных сигналов всех логических элементов и запрещённое состояние триггера может быть выявлено в этом случае по совпадению в течении длительного времени состояний сигналов на прямом и инверсном выходах.

Наиболее распространённые типы триггеров:

Триггер с двумя установочными входами ( $R - S^{\bar{}}$  триггер), изменяющий своё состояние только при воздействии управляющего сигнала на определённый вход ( $R$ -или  $S^{\bar{}}$  вход), приём повторное воздействие сигнала на тот же вход Триггер не изменяет его состояния;

Триггер задержки ( $D$ -триггер), состояние которого и соответствующий ему выходной сигнал повторяют входной сигнал.

Триггер со счётным входом ( $T$ -триггер), который изменяет своё состояние на противоположное с каждым входным сигналом;

Универсальный триггер ( $J - K$ -триггер), обладающий свойствами  $T$ -триггера и  $R - S^{\bar{}}$  триггера;

Кроме триггеров этих типов, применяют комбинированные триггеры, представляющие собой универсальные многофункциональные устройства с большим числом входов.

### **Асинхронный RS-триггер**

Асинхронный RS-триггер является базовым при создании более сложных триггеров.

В простейшем случае асинхронный RS-триггер имеет два входа:  $S$  (Set) - вход установки триггера в единичное состояние,  $R$  (Reset) - вход установки триггера в нулевое состояние. Активный сигнал по входу  $S$  в момент появления заставляет триггер перейти в единичное состояние. Активный сигнал по входу  $R$  в момент появления заставляет триггер перейти в нулевое состояние.

В простейшем случае подобный триггер строится на двух элементах 2И-НЕ. Принципиальная схема триггера представлена на рисунке 1.

Проанализируем работу этой схемы с целью определения активного сигнала.

Считаем выход элемента  $DD1$  прямым. По заданному положению прямого выхода определим положения входов установки триггера в ноль ( $R$ ) и в единицу ( $S$ ). Если предположить, что единица на верхнем входе, то состояние выходного сигнала  $DD1$  будет зависеть от сигнала с выхода  $DD2$ . То есть единица на этом входе не заставляет схему непременно менять своё состояние. Это пассивный уровень сигнала на верхнем входе. Если на верхнем входе логический ноль, то независимо от сигнала с  $DD2$  на выходе  $DD1$  спустя время задержки одного элемента тзд появится единица, если её до прихода нуля на верхний вход не было. Сформированная единица, поступая на вход  $DD2$  при наличии на нижнем входе  $DD2$  единицы приведет к появлению нуля на выходе  $DD2$  спустя время задержки тзд. То есть через время  $2tзд$  состояние сигнала на верхнем входе может быть изменено на противоположное. Триггер к этому моменту перешел в новое, единичное состояние.

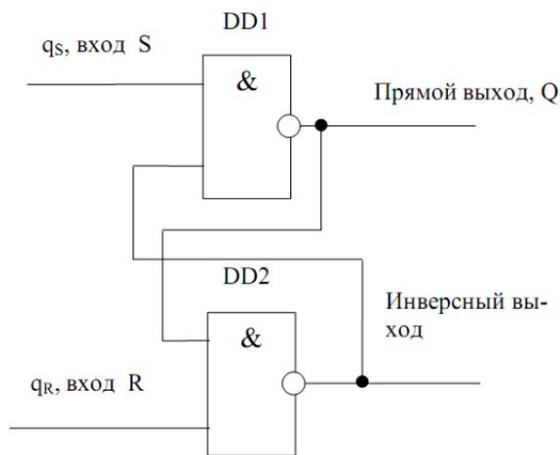


Рисунок 1. Функциональная схема RS-триггера

Таким образом, активным сигналом на верхнем входе является 0, этот вход является входом S, поскольку приводит к появлению 1 на выходе Q. Поскольку схема симметрична, можно предположить, что нижний вход является входом сброса триггера в ноль R, причём активным сигналом и для этого входа является ноль. Сигналы на этих входах можно обозначить символами  $qS$ ,  $qR$ . Но в данной работе часто будем обозначать сигналы на временных диаграммах идентификаторами входов, то есть в данном случае буквами S и R. Временные диаграммы работы триггера с учётом задержки сигнала в элементах предложены на рисунке 2.

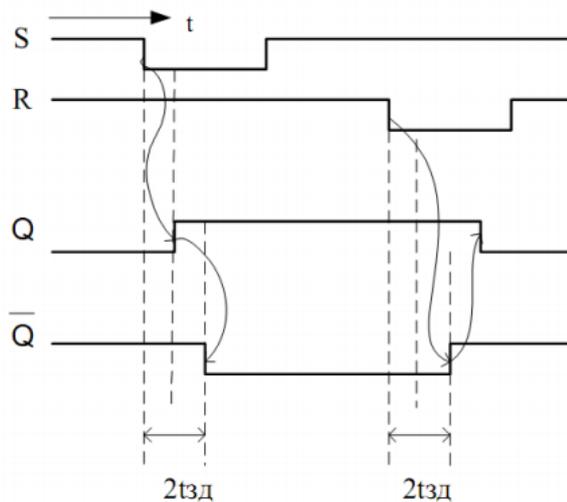


Рисунок 2. – Временные диаграммы работы RS-триггера с учётом задержки элементов

Если предположить, что на оба входа одновременно подаются активные сигналы, то есть нули, то на обоих выходах формируются одновременно единицы. Триггер оказывается в запрещённом состоянии, которое поддерживается активными сигналами на входах. Если одновременно изменить состояние входных сигналов на пассивное, то в триггере может наблюдаться паразитная генерация с периодом  $2t_{зд}$ , которая прекратится в непредсказуемый момент времени, триггер перейдёт в определённое, но непредсказуемое состояние.

Если триггер реализован в составе микросхемы или необходимо изобразить его на функциональной схеме без показа внутреннего состава, то условное обозначение RS-триггера должно учитывать, что активными сигналами по входам являются нулевые уровни. Следовательно, на входах необходимо изобразить символы инверсии, как показано на рисунке 3.

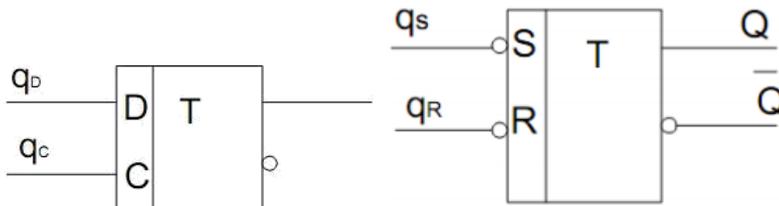


Рисунок 3. - Условное обозначение асинхронного RS-триггера на электрических схемах

Поведение триггера можно определить сокращённой таблицей переходов (таблица 1), в которой сигналы на входах R и S определены для момента времени  $t$ , а состояние триггера определяется для следующего момента времени, который определяют как  $t+1$ .

Таблица 1

$q_S(t)$	$q_R(t)$	$Q(t+1)$	Примечание
0	0	-	запрещено
0	1	1	единица
1	0	0	нуль
1	1	$Q(t)$	хранение

### Синхронный одноступенчатый D-триггер.

По сигналу синхронизации на своём прямом выходе D-триггер повторяет состояние сигнала на входе D (Delay).

Возможное схемное решение D-триггера предложено на рисунке 4. При  $C=0$  триггер хранит информацию, поскольку на выходах D1, D2 присутствуют единицы, что соответствует пассивным сигналам асинхронного триггера D3, D4. При  $C=1$  в триггер записывается состояние сигнала D. Если  $D=0$ , то на выходе D1 формируется единица, а на выходе D2 формируется ноль, что приводит к записи в триггер нуля.

Условное обозначение D-триггера приведено на рисунке 4.

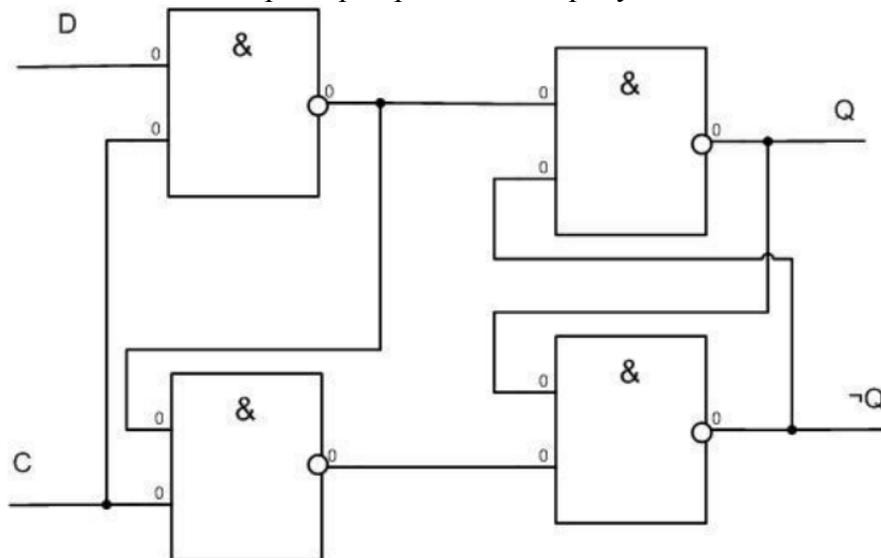


Рисунок 4. – Схема D-триггера с потенциальным управлением

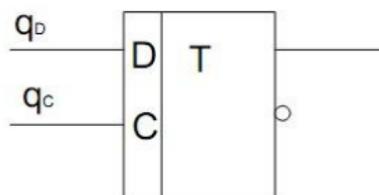


Рисунок 5 Условное обозначение D-триггера

Поведение триггера описывается таблицей переходов (таблица 2).

Таблица 2. Таблица переходов D-триггера

	C	D	Q(t-1)	Q(t)	Пояснения
	0	x	0	0	Режим хранения информации
	0	x	1	1	
	1	0	x	0	Режим записи информации
	1	1	x	1	

Для D-триггера нет запрещённой комбинации сигналов на входах D и C.

Поведение D-триггера изображено на временных диаграммах, изображённых на рисунке 6.

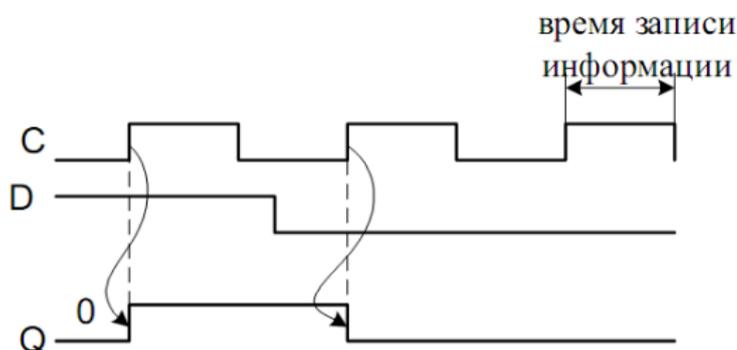


Рисунок 6. – Временные диаграммы работы D-триггера

При активном синхросигнале нежелательно менять состояние сигнала на информационном входе D. В момент окончания действия активного синхросигнала происходит переход триггера из режима записи в режим хранения принятой информации. Как бы триггер защёлкивается в новом состоянии. Поэтому подобные триггеры иногда называют триггерами-защёлками.

Обратите внимание на тот факт, что при активном синхросигнале изменение состояния сигнала на входе D повторяется на выходе. То есть триггер превращается в повторитель входного сигнала. Этим фактом иногда пользуются для повышения, например, нагрузочной способности схемы.

**Задание на лабораторную работу.**

Собрать RS-триггер по схеме, изображенной на рисунке 1. Проверить работу схемы на осциллографе, зарисовать диаграммы, составить таблицы переходов.

Собрать D-триггер по схеме, изображенной на рисунке 4. Проверить работу схемы на осциллографе, зарисовать диаграммы, составить таблицы переходов.

По результатам работы сформировать отчёт. Отчёт должен содержать:

- Схему собираемого устройства;
- Временные диаграммы работы устройства;
- Таблицы переходов триггеров.

**Контрольные вопросы:**

1. Что называется триггером?
2. Типы триггеров
3. Нарисуйте временные диаграммы работы синхронного и асинхронного RS-триггеров.
4. Какая комбинация на входах RS-триггера называется запрещенной и почему?
5. Что такое время подготовки и время выдержки D-триггера и почему они имеют такие значения?
6. В чем отличие JK-триггера от RS-триггера?
7. Принцип работы синхронного D-триггера.

8. Почему возникает необходимость в построении двухступенчатых триггерных устройств?

### Лабораторная работа № 6 Исследование работы реверсивных счётчиков импульсов

Время выполнения – 2 часа.

Цель работы: изучение принципов построения и работы электронных счётчиков импульсов с различными коэффициентами пересчета при помощи математического моделирования с использованием средств и методов вычислительной техники.

#### 1.1 Указания к организации самостоятельной работы

При подготовке к работе необходимо усвоить принцип действия JK -триггера, ознакомиться с принципами построения двоичного счетчика и счетчиков с другими коэффициентами пересчета, изучить работу дешифраторов и устройств индикации [1, с.232-247, 355,359; 2, с.164-174]. По справочнику определить основные параметры и характеристики современных микросхем триггеров, счетчиков, дешифраторов и индикаторов [3, с.86-105, 125]. Следует ознакомиться с особенностями моделирования триггерных схем и счетчиков в системе Electronics Workbench 5.0 [4, с. 239-247].

*Триггеры.* Дискретные счётчики строятся из двоичных ячеек – триггеров. В настоящее время в счетчиках используется большое разнообразие триггеров: RS-, T-, JK-, D-триггеры. Наиболее универсальными из перечисленных типов триггеров являются JK -триггеры. Счетчики с любым коэффициентом пересчёта выполняются на этих триггерах без каких-либо дополнительных элементов. Это обусловило широкое применение JK - триггеров в электронных счетчиках.

Работа JK- триггера описывается следующим логическим уравнением:

$$Q^{n+1} = \overline{K}^n \cdot Q^n + J^n \cdot \overline{Q}^n, (1.1)$$

где  $Q^n$ ,  $K^n$ ,  $J^n$  - соответственно значения выходного сигнала и сигналов на входах К и J на данном такте;

$Q^{n+1}$  – значение выходного сигнала на последующем такте.

По уравнению (1.1) можно построить таблицу состояний JK триггера для различных входных сигналов.

$Q^n$	$J^n$	$K^n$	$Q^{n+1}$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

Из уравнения и таблицы видно, что JK- триггер не меняет своего состояния, если на входах J и K действуют нули, устанавливается в состояние "1", если на входе J действует "1", на входе К – "0", устанавливается в состояние "0", при наличии на входе J "нуля", а на входе К – "единицы, и, наконец, изменяет свое состояние на противоположное, если на обоих входах действуют единичные сигналы. Отсюда следует, что при воздействии сигналов в отдельности на входы J и К, JK - триггер аналогичен RS –триггеру, а при подаче сигналов одновременно на К, J - входы (т.е. при их объединении) работает как счетный триггер. Причем, переключение происходит по окончании сигнала. JK- триггеры, выпускаемые в микроиспол-

нении, обычно имеют счетный вход, несколько J и K входов и два установочных входа. По счетному, J, K входам триггер управляется единичными сигналами, а по установочным – нулевыми. Например, сдвоенный ТТЛ JK - триггер типа K555ТВ6, имеет по одному счётному и по одному J, K, R –входу. Его параметры следующие:  $U_{\text{вых}}^0 \leq 0,4 \text{ В}$ ,  $U_{\text{вых}}^1 \geq 2,5 \text{ В}$ ,  $K_{\text{раз}}=10$ ,  $t_{\text{зр}}^{1,0} \leq 10 \text{ нс}$ ,  $t_{\text{зр}}^{0,1} \leq 10 \text{ нс}$ ,  $P_{\text{пот}} \leq 2 \text{ мВт}$ ,  $f \leq 15 \text{ МГц}$ .

*Двоичные счетчики.* Триггер со счётным входом делит частоту входных сигналов на два. Двоичный счётчик получают путём каскадного соединения триггеров. Частота выходных импульсов n- разрядного двоичного счётчика в  $2^n$  раз меньше частоты входных сигналов. При использовании JK- триггеров, а также других триггеров, выход Q (прямой) предыдущего триггера соединяют со счётным входом последующего. Если со счётными входами

соединить не выходы Q, а инверсные выходы  $\bar{Q}$ , считая по-прежнему выходами Q, то счётчик будет вычитающим.

Вводя специальные логические схемы между триггерами, можно осуществить в одном счётчике и суммирование и вычитание. Такой счётчик называется реверсивным.

*Счетчики с произвольным коэффициентом пересчета.* В ряде случаев требуется при помощи бинарных ячеек построить счетчик, работающий в системе счисления с основанием, не равным целой степени числа 2. Особенно часто применяют десятичные счетчики, работающие в десятичной системе счисления. Для построения такого счетчика (одной декады) обычно используют четыре триггера. При этом возникает задача исключения лишних состояний четырехразрядного двоичного счетчика. Эта задача решается самыми различными способами, число которых весьма велико. Конечная цель этих способов – сброс счетчика в "ноль" по приходу десятого импульса.

По одному из способов второй и третий триггер после восьмого или девятого импульса принудительно устанавливаются в единичное состояние. При этом в счетчике будет записано двоичное число 1110 или 1111. Тогда в первом случае после поступления еще двух, а во втором – одного импульса счетчик устанавливается "ноль". Названные способы связаны с некоторым неудобством при дешифрации двоичного кода.

Другие способы направлены на то, чтобы предотвратить срабатывание второго и третьего триггера при поступлении десятого импульса и сбросить в "ноль" первый и четвертый. Это достигается введением различных запрещающих и разрешающих обратных связей и созданием "обходных" путей. Конкретная реализация того или иного способа зависит от типа применяемых триггеров.

Рассмотрим работу десятичного счетчика на JK - триггерах, в котором реализуется последний способ исключения избыточных состояний (рис. 1). Пусть исходное состояние счетчика – нулевое. При поступлении на вход первых семи импульсов счетчик работает как двоичный. Сигналы, поступающие с выхода первого триггера  $Q_1$  на вход K четвертого триггера, до этого не меняют его состояния. После седьмого импульса состояние счетчика будет 0111, значит, на входах J,K четвертого триггера будут действовать "единицы". По приходу восьмого импульса первый, второй и третий триггеры переключаются в нулевое состояние. При этом четвертый триггер устанавливается в единичное состояние. На выходе  $Q_4$  устанавливается "ноль". Этот "ноль" подаётся на вход J второго триггера и запрещает его переключение по счётному входу. Девятый импульс переводит первый триггер в единичное состояние. На входе четвертого триггера при этом действует "0", а на входе K – "1". Десятый импульс переключает первый триггер в нулевое состояние и поэтому четвертый триггер также устанавливается в "ноль" (переключение J,K триггера происходит на заднем фронте сигнала). Так как переключение триггеров происходит с определенной задержкой, то к моменту установления на выходе  $Q_4$  единичного уровня на счетном входе второго триггера успевает установиться ноль и его состояние (нулевое) не меняется. Таким образом, счетчик в целом устанавливается в нулевое состояние. Аналогичным способом может быть построен счетчик и с другим коэффициентом пересчета, не равным 2.

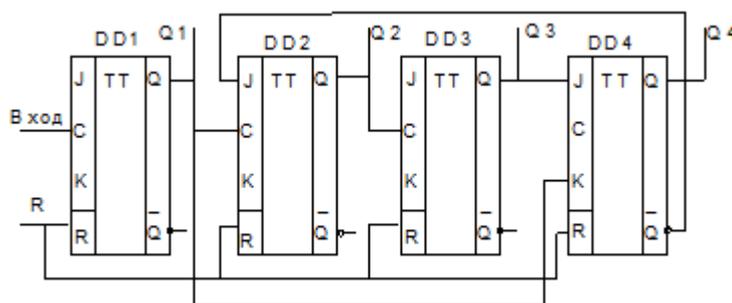


Рисунок 1 Схема десятичного счетчика

Помимо указанных способов может быть применен способ, в котором используется самоустановка счётчика в определенное состояние, в частности, в ноль по поступлении на вход заданного количества импульсов. По этому способу сигналы с выходов триггеров подаются на схему И, а с ее выхода на входы "Установка нуля триггеров". При образовании комбинации выходных сигналов, определяемой заданным коэффициентом пересчёта, на выходе схемы И устанавливается уровень, который производит сброс счетчика. Например, чтобы получить коэффициент пересчета 10, сигналы с выходов Q4 и Q2 подаются на входы схемы И. Для принудительной установки нуля счетчика (вручную) на один из входов схемы И подаются единичный сигнал или просто размыкают контакт, соединяющий этот вход с "землей". Подобным образом можно получить и другие коэффициенты пересчета, руководствуясь таблицей состояний двоичного счетчика.

#### *Описание лабораторной работы*

В лабораторной работе исследуется функционирование реверсивного четырехразрядного счетчика с изменяемым коэффициентом пересчета на основе JK-триггеров, схема которого изображена на рис. 2.

Счетчик построен на синхронных JK-триггерах К555ТВ6 DD1-DD4 с асинхронным входом установки в "0" (вход R). Сигнал сброса подается от источника логической единицы +Vcc с помощью ключа К8, он автоматически замыкается в верхнее положение на время 1 мс в начале каждого запуска программы моделирования. Синхровходы всех триггеров объединены, на них с помощью ключа К2 подается входной сигнал уровня логической "1" от генератора логического сигнала G1 с частотой 1 Гц. Замыкание и размыкание ключа К2 осуществляется нажатием клавиши "Пробел" клавиатуры. На входы J и К первого триггера DD1 постоянно подан уровень логической "1", т. е. он работает в счетном режиме. На объединенные между собой J и К входы каждого последующего триггера (DD2-DD4) поступает сигнал с выхода предыдущего триггера. В данный момент времени переключаются только те триггеры, на J и К входах которых присутствует "1". Так, если текущее состояние выходов счетчика Q1 Q2 Q3 Q4 равно 1,0,1,0, то по приходу очередного входного сигнала переключаются только DD1 и DD2. DD4 не переключится, т.к. на выходе DD7 присутствует "0", обусловленный логическим "0" с выхода DD6.

Переключение счетчика из режима суммирования в режим вычитания происходит с помощью ключа К1 и логических элементов DD5-DD13. Ключ К1 переключается из верхнего положения в нижнее при нажатии клавиши R клавиатуры. При подаче "1" на элемент DD5 (К1 в верхнем положении) разрешена работа элементов И DD5, DD6 и DD7. К J и К входам триггеров подключаются прямые выходы предыдущих триггеров, счетчик работает в режиме суммирования. При этом работа элементов И, DD8, DD9, DD10 запрещена отсутствием уровня логической 1 от источника +Vcc. Если ключ К1 находится в нижнем положении, запрещается работа элементов DD5, DD6, DD7 и разрешается работа элементов DD8, DD9, DD10. На J и К входы триггеров через элементы ИЛИ (DD11 – DD13) поступают сигналы с инверсных выходов предыдущих триггеров. Счетчик работает в режиме вычитания.

Состояния разрядов счетчика (выходов триггеров) отображаются индикаторами EL1 – EL4. Наличие уровня "1" на выходе триггера приводит к зажиганию соответствующего индикатора.

На элементе DD14 построена схема совпадения, которая с помощью ключей K3 – K6 позволяет изменять коэффициент пересчета счетчика. Коэффициент пересчета задается ключами K3 – K6 в двоичном коде. Например, если K3 и K5 замкнуты, то  $K_{пер}=5$ , если замкнуты K5 и K6 –  $K_{пер}=12$  и т.д. В последнем случае к входам DD15 подключаются выходы Q3 и Q4. Когда на них появятся логические 1, сработает DD14, логическая 1 с его выхода поступит на R-входы всех триггеров, и они сбросятся в "0" ( $Q3=Q4="1"$  соответствует числу 12). Управление ключами K3-K6 осуществляется клавишами 1, 2, 4, 8 клавиатуры соответственно.

Число, хранящееся в счетчике, отображается с помощью индикатора HL1, который работает в шестнадцатеричной системе, т.е. число 10 индицируется как A, 11-как b, 12-как C, 13 –как d, 14-как E, 15-как F.

Индикаторы EL5 и EL6 играют вспомогательную роль и отображают наличие входного импульса и импульса сброса.

При верхних положениях ключей K3-K6 с помощью ключа K7 можно осуществлять ручной сброс всех триггеров (клавиша S клавиатуры).

Элемент DD15 играет вспомогательную роль, его наличие обусловлено особенностями программы моделирования EWB5.0.

#### *Порядок выполнения работы*

Вызвать программу EWB5.0. С помощью команды Open открыть файл со схемой лабораторного макета под именем Shetchic.ewb. Установить масштаб изображения таким, чтобы на схеме в достаточной степени были видны ее компоненты, надписи и переключатели. В случае необходимости использовать полосы прокрутки.

Исследовать суммирующий двоичный четырехразрядный счетчик. Для этого установить ключи K1, K3-K7 в верхнее положение, а ключ K2 – в нижнее положение. Запустить моделирование путем нажатия кнопки 0/1, расположенной в правом верхнем углу экрана. При этом на индикаторе появится 0 - начальное состояние счетчика. Нажимая клавишу "Пробел", получить все состояния счетчика от нуля до 15. Записать полученные данные в таблицу, столбцами которой являются: Q1, Q2, Q3, Q4, показания HL1. Состояние выхода триггера единичное, если соответствующий индикатор EL горит. Определить коэффициент пересчета такого счетчика.

Исследовать вычитающий двоичный четырехразрядный счетчик. Для этого перевести ключ K1 из верхнего положения в нижнее. Запустить моделирование. Пронаблюдать за изменением показаний индикатора HL1. Определить коэффициент пересчета такого счетчика. Сделать выводы.

Исследовать реверсивный режим двоичного счетчика. Включить счетчик в режиме суммирования. Не дожидаясь, когда индикатор сбросится в 0, переведите клавишей R счетчик в режим вычитания, а затем наоборот. Запишите полученные показания индикатора и поставьте им в соответствие двоичный код выходов триггеров.

Исследовать суммирующий счетчик с произвольным коэффициентом пересчета. Для этого при замкнутом состоянии ключа K7 путем переключения соответствующих ключей K3-K6 в нижнее положение установить 3 различных коэффициента пересчета. Полученные данные занести в таблицу, аналогичную п. 2. Проследить за поведением индикатора EL6.

Исследовать вычитающий счетчик с произвольным коэффициентом пересчета. Для этого перевести счетчик в двоичный режим суммирования и остановить его, разомкнув ключ K2, когда на индикаторе появится число 9. Не выключая клавишу моделирования 0/1 перевести счетчик в режим вычитания, замкнуть ключ K7, установить ключ K5 в нижнее положение (соответствующее коэффициенту пересчета, равному 4) и замкнуть ключ K2. Записать полученные данные и объяснить их. Затем в любом режиме установить на индикаторе число 7. Не выключая клавишу моделирования установить режим вычитания, замкнуть ключ K7,

установить ключ К6 в нижнее положение (соответствующее коэффициенту пересчета, равному 8) и замкнуть ключ К2. Записать полученные данные и дать им объяснение. Установить с самого начала режим вычитания с произвольным коэффициентом пересчета и включить моделирование. Убедиться в том, что показания индикатора HL1 остаются нулевыми, несмотря на наличие входного сигнала (индикатор EL5 "мигает"). Объяснить полученный результат.

Изменяя частоту входного сигнала, найти такое ее значение, при котором счетчик перестает нормально функционировать. Объяснить полученный результат.

#### *Содержание отчета*

В отчете должна содержаться схема исследуемого счетчика, таблицы состояний в режимах суммирования, вычитания и реверса; результаты исследования счетчика в режиме вычитания с произвольным коэффициентом пересчета, анализ полученных результатов; значение предельной частоты входного сигнала; выводы по работе в целом.

#### **Контрольные вопросы и задания**

- 1 Какие типы триггеров могут быть использованы в счетчиках и почему?
- 2 Назовите параметры и характеристики счетчиков.
- 3 Охарактеризуйте основные типы счетчиков (суммирующие, вычитающие, реверсивные, кольцевые, синхронные, асинхронные, двоичные, двоично-десятичные и др.).
- 4 Каковы принципы построения суммирующих, вычитающих и реверсивных счетчиков?
- 5 Приведите примеры современных интегральных схем счетчиков, выполненных по различным технологиям (ТТЛ, ЭСЛ, на полевых транзисторах). Назовите их электрические параметры и характеристики.
- 6 В каких устройствах применяются счетчики?

### **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

Самостоятельная работа студентов является обязательной для каждого студента, а её объём определяется учебным планом. Формы самостоятельной работы студентов определяются содержанием учебной дисциплины, степенью подготовленности студентов.

Самостоятельная работа — одна из важнейших форм овладения знаниями. Самостоятельная работа включает многие виды активной умственной деятельности студента: слушание лекций и осмысленное их конспектирование, глубокое изучение источников и литературы, консультации у преподавателя, написание реферата, подготовка к практическим и лабораторным занятиям, экзаменам, самоконтроль приобретаемых знаний и т.д.

Изучение дисциплины следует начинать с проработки настоящей рабочей программы, особое внимание уделяя целям и задачам, структуре и содержанию курса.

Студентам рекомендуется получить в научной библиотеке университета учебную литературу по дисциплине, необходимую для эффективной работы на всех видах аудиторных занятий, а также для самостоятельной работы по изучению дисциплины.

Теоретический материал курса становится более понятным, когда дополнительно к прослушиванию лекции и изучению конспекта, изучаются и книги. Легче освоить курс, придерживаясь одного учебника и конспекта. Рекомендуется, кроме «заучивания» материала, добиться состояния понимания изучаемой темы дисциплины. С этой целью рекомендуется после изучения очередного параграфа выполнить несколько простых упражнений на данную тему. Кроме того, очень полезно мысленно задать себе следующие вопросы (и попробовать ответить на них): о чем этот параграф, какие новые понятия введены, каков их смысл, что даст это на практике?

При организации самостоятельной работы студенты особое внимание должны уделять анализу учебно-методической литературы по дисциплине.

Процесс организации самостоятельной работы студентов включает в себя следующие этапы:

1. Подготовительный (определение целей, составление программы, подготовка методического обеспечения, подготовка оборудования).

2. Основной (реализация программы, использование приемов поиска информации, усвоения, переработки, применения, передачи знаний, фиксирование результатов, самоорганизация процесса работы).

3. Заключительный (оценка значимости и анализ результатов, их систематизация, оценка программы и приемов работы, выводы о направлениях оптимизации труда).

Тематика заданий для самостоятельной работы представлена в рабочей программе.