

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

В.Т. Рябов

**КОМПЛЕКСНАЯ РАЗРАБОТКА
МЕХАНИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОННЫХ
И ПРОГРАММНЫХ КОМПОНЕНТОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Часть 1. Функции, структура и элементная база
систем автоматического управления

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия
по курсу «Системы автоматического управления
технологическим оборудованием»*

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2012

УДК 621.01:621.38:681.3.06
ББК 30.606
Р98

Рецензенты: *В.К. Москвин, В.В. Одинок*

Рябов В. Т.

Р98 Комплексная разработка механических, электронных и программных компонентов технологического оборудования : учеб. пособие. – Ч. 1 : Функции, структура и элементная база систем автоматического управления / В. Т. Рябов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 122, [2] с. : ил.

Первая часть учебного пособия посвящена анализу вариантов построения систем автоматического управления (САУ) оборудованием электронной техники. В основу положено представление технологической машины как сложной иерархической системы, состоящей из исполнительных механизмов, системы их энергообеспечения и управления. При этом различные компоненты машины взаимодействуют на уровне материальных, энергетических и информационных потоков. Рассмотрены функции и вариантность элементной базы САУ, их структурное построение и электронные компоненты САУ. Заложены основы единого подхода к проектированию механических, электронных и программных компонентов технологического оборудования и постановки четких технических заданий и технических предложений, относящихся к этим компонентам, на начальных этапах проектирования.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, обучающихся по специальностям «Инженерные нанотехнологии в машиностроении» и «Электронное машиностроение». Учебное пособие может быть полезно студентам других машиностроительных специальностей.

УДК 621.01:621.38:681.3.06
ББК 30.606

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Системы автоматического управления технологическим оборудованием» посвящен изучению основ проектирования современных систем управления оборудованием для реализации электронных технологий.

Особенности оборудования электронных технологий. Оборудование электронных технологий появилось в процессе естественной эволюции оборудования для производства электровакуумных и полупроводниковых приборов. Первоначально технологические машины имели предметную специализацию, т. е. были предназначены для выпуска определенных классов приборов (линии производства ламп накаливания, линии сборки, заварки и откочки приемно-усилительных ламп, цеха и заводы по выпуску цветных кинескопов, интегральных схем и т. п.). Затем сформировались технологические переделы и соответствующее им оборудование (машины для термовакуумной обработки, оборудование для фотолитографии, нанесения тонких пленок и др.). Эти технологические машины называли оборудованием электронных технологий, а реализуемые ими технологии – электронными [1], что связано с предметом их обработки (с электронными приборами), а не с инструментами технологий. В большинстве машин электронный или ионный луч как инструмент не используется. Постепенно помимо основных объектов производства – изделий электронной техники – электронные технологии стали применять для широкого класса изделий, а тонкие пленки – использовать в металлообработке для упрочнения инструмента. Методы фотолитографии и обработки монокристаллов кремния породили новую отрасль – микромеханику и т. д.

Под терминами «электронные технологии» и «оборудование электронных технологий» будем понимать широкий класс доста-

точно универсальных технологий и оборудования, используемых для производства электровакуумных и полупроводниковых приборов и интегральных схем:

- оборудование для термовакуумной обработки, в том числе средства получения вакуума;

- оборудование для фотолитографии, в том числе машины для ионной имплантации;

- оборудование для нанесения тонких пленок в вакууме.

Рассмотрим специфические особенности оборудования электронных технологий.

В связи с **коротким периодом эволюции** оборудования электронных технологий многие технические решения еще недостаточно отработаны по сравнению с техническими решениями в металлорежущем оборудовании. В электронной технике сменилось не более трех-четырёх поколений оборудования, не устоялись конструктивные решения отдельных исполнительных механизмов и устройств, а также структурно-компоновочные решения всей технологической машины. В связи с этим особую важность приобретают начальные этапы проектирования, на которых разрабатывается техническое предложение на машину, закладываются функции системы управления и энергообеспечения, выбираются перечень элементов машины и структура их объединения в систему.

Уникальность технологических процессов, проводимых подчас на грани физических возможностей, требует тщательной отработки технических решений отдельных исполнительных механизмов, поэтому широко развивается унификация отдельных исполнительных механизмов и других устройств и подсистем, например магнетронных источников и блоков питания к ним, вакуумных систем и их элементов. Появилось так называемое кластерное оборудование, представляющее собой машины, комплектуемые из унифицированных элементов и подсистем со стандартизованным механическим, энергетическим, информационным и программным интерфейсами. В связи с этим возрастает важность и относительная трудоемкость выполнения работ на начальных этапах проектирования и возникает необходимость уже на этих этапах решать вопросы аппаратной и программной совместимости элементов.

Сложность и многомерность технологий подчас просто не позволяют управлять машиной вручную. Управление идет в

масштабах времени и координат, невысказанных для человека. Микропроцессорные средства управления становятся неотъемлемым элементом машины. Вполне естественно, что машинами для производства микропроцессоров в первую очередь стали управлять с использованием средств микропроцессорной техники. За рубежом и в России в настоящее время выпускаются промышленные контроллеры и рабочие станции на платформе IBM PC, которые могут эффективно выполнять функции центральных, узловых и локальных контроллеров в технологическом оборудовании электронных технологий. Эти средства управления при их разумном выборе и рациональном использовании могут реализовать уникальные технологии и резко повысить эффективность эксплуатации машины.

Новые приводы и средства управления вызывают революционные преобразования структурно-компоновочных решений и перераспределение функций между механическими, электронными и программными компонентами оборудования. Появление прецизионных преобразователей электрической и иных видов энергии в координатные перемещения за счет использования не только обратных связей, но и изначально кинематически более точных, вытесняют традиционные кинематические цепи, однако они требуют, в свою очередь, специальных средств управления энергетическими потоками. Кинематические связи заменяются связями между энергетическими потоками. Эти связи могут быть организованы жесткой структурой блоков энергопитания и управления или связями в программном обеспечении. Новые приводы и средства управления реализуют свои преимущества лишь в рамках достаточно гибких структур, закладываемых на начальных этапах проектирования.

Таким образом, структурой системы автоматического управления (САУ), которая должна прорабатываться на этапе технического предложения в комплексе со структурой исполнительных механизмов и системой их энергообеспечения, во многом определяется структурно-компоновочное решение машины в целом.

Состав оборудования электронных технологий. Любая технологическая машина обрабатывает материальные, энергетические и информационные потоки. В зависимости от обрабатываемого потока и целевого назначения элементы или подсистемы машины можно объединить в систему целевых механизмов, си-

стему энергообеспечения, или энергопитания, и систему управления (рис. В1).



Рис. В1. Состав технологической машины

Исполнительные, или целевые, механизмы ИМ взаимодействуют непосредственно с полуфабрикатами и заготовками. На входе таких механизмов материальный поток М представляет собой заготовки и технологические среды обработки. Для осуществления работы целевые механизмы нуждаются в потоке энергии Э того или иного вида (электропривод, пневмопривод, гидропривод и т. п.). Основное назначение энергетического потока – совершение работы по предписанному технологией преобразованию свойств полуфабрикатов.

Основная задача системы энергообеспечения заключается в питании исполнительных механизмов тем или иным видом энергии. Для этого система получает поток энергии извне и, преобразуя и модулируя его должным образом, передает ИМ.

Система автоматического управления САУ преобразует информационные потоки. Основная задача или основная целевая функция системы: на основе информации о состоянии объекта управления И (состоянии системы целевых механизмов и системы энергообеспечения) – выдать управляющие воздействия, обеспечивающие функционирование технологической машины в соответствии с предписанной или директивной технологией.

В развитом исполнительном механизме также можно выделить подсистемы исполнительных механизмов, энергообеспечения и управления. На рис. В1 это отражено в виде рекурсии, когда структура технологической машины многократно отображена в структуре исполнительного механизма.

Подсистемы и элементы машины соединены между собой и взаимодействуют через материальные, энергетические и информационные потоки. Для каждого элемента или каждой подсистемы можно выделить *целевой интерфейс*, определяющий их назначение и способ взаимодействия в машине; *механический интерфейс*, определяющий расположение, крепление и подключение элемента к материальным потокам; *энергетический интерфейс*, определяющий виды и характеристики питающих его потоков энергии и правила их взаимодействия; *информационный интерфейс*, определяющий виды, характеристики и правила (протоколы) обмена информацией на различных функциональных уровнях.

Определить элемент или подсистему технологической машины и сформулировать четкое техническое задание для их дальнейшей проработки – значит полностью описать их целевой, механический, энергетический и информационный интерфейсы.

Таким образом, все три рассмотренные системы технологической машины оказываются распределенными по ряду иерархических уровней и обрабатывают материальные потоки, потоки энергии и информации как между отдельными исполнительными механизмами, так и внутри них.

Информация, снимаемая с датчиков, характеризующих состояние объекта и технологического процесса, может быть представлена в дискретном (чаще всего двоичном) и аналоговом виде. Аналогично представляется и управляющая информация.

В соответствии с этим для связи с объектом управления необходимо иметь четыре вида сигналов: дискретное управление и дискретный контроль (ДУ и ДК) и аналоговое управление и аналоговый контроль (АУ и АК). Кроме того, для обмена между микроконтроллерами как внутри объекта, так и за его пределами (обмен с цеховыми системами управления и иными информационными системами) используется обмен по последовательным каналам связи.

При аналоговом представлении информация непосредственно «зашита» в значении контролируемого или выдаваемого на объект управления сигнала (напряжения или тока), например напряжение с датчика давления 3,45 В. Это напряжение исходя из характеристики датчика легко может быть преобразовано в соответствующее давление. Например, характеристика типового датчика давления имеет вид $U = -0,6 + 0,05p$, где U – выходное напряжение датчика, В; p – давление, кПа.

При дискретном кодировании во внимание принимается соотношение рассматриваемой величины и нескольких порогов сравнения. При двоичном кодировании – порог сравнения один и информация может приобретать два значения: «0», если величина меньше порога, и «1», если величина больше порога. Широкое применение в вычислительной технике получили сигналы ТТЛ-уровня (уровня транзисторно-транзисторной логики). При этом сигнал считается равным нулю, если его напряжение $U_c < 0,8$ В, и равным единице, если $U_c > 2,2$ В. В диапазоне от 0,8 до 2,2 В сигналов быть не должно, что повышает надежность их распознавания.

Единицей количества информации в дискретном представлении является бит. Эта информация содержится в сообщении о наступлении одного из двух равновероятных событий.

Функции системы автоматического управления можно подразделить на три класса: основные целевые функции, сервисные функции и функции коррекции цели.

Основные целевые функции предназначены для управления технологическим процессом в соответствии с предписанной директивной технологией. Эта технология может быть задана на разных уровнях – от жесткого описания поведения объекта в пространстве состояний его параметров до указания цели функционирования. При этом система сама выбирает оптимальную траекторию исходя из заложенных в нее правил (алгоритма) или даже оптимизирует эти правила в результате накопления и анализа опыта работы. Для реализации целевой функции система должна принимать от объекта необходимую информацию, рассчитывать и выдавать на него управляющие сигналы.

Сервисные функции направлены на обеспечение наилучшей организации выполнения целевых функций в результате поддержания безотказности, ремонтпригодности и долговечности машины.

Микропроцессорные САУ имеют очень широкие возможности по реализации сервисных функций. Именно этим классом функций подчас существенно определяется эффективность оборудования. Известны следующие примеры сервисных функций: автоматическое резервирование; предотвращение катастрофических последствий отказов и повышение ремонтпригодности; диагностика и предсказание отказов; отслеживание остаточного ресурса механизмов; защита от программных и аппаратных сбоев САУ и др.

Система управления должна эффективно поддерживать работоспособность оборудования. Например, в сверхвысоковакуумных откачных установках при отказе основного вакуумметра, САУ автоматически переходит на управление от резервного. Если и он откажет, могут использоваться альтернативные источники информации о давлении в системе, например магниторазрядный насос (значение силы тока разряда).

Функции коррекции цели предназначены для изменения алгоритма работы САУ на уровне технолога или оператора и должны иметь логичный и дружелюбный интерфейс, поскольку во многом определяют возможности адаптации машины к условиям конкретного пользователя и удобство работы на ней.

Функции САУ укрупненно определяют цель действий, отвечают на вопрос, что должна делать машина, не конкретизируя, как это делать. Для реализации каждой из функций предусматривается ряд параллельно протекающих последовательных процессов. В последующих разделах изучаемого курса вернемся к детальному рассмотрению отдельных функций САУ.

Концепции последовательной и параллельной проработки компонентов технологической машины. В разработке современной технологической машины принимают участие три группы специалистов: инженеры-механики, разрабатывающие машину в целом и ее целевые механизмы; инженеры-электрики и инженеры-электронщики, разрабатывающие систему энергообеспечения и аппаратную часть системы управления; инженеры-программисты, разрабатывающие программное обеспечение.

Исходя из заданной технологии в большинстве случаев первоначально создаются механические компоненты машины – исполнительные механизмы, затем система управления и ее программное обеспечение. Таким образом, сложилась цепочка технология – механические компоненты – аппаратная часть системы управления –

программное обеспечение. Обратные связи в этой последовательности, как правило, реализуются слабо. Если разработчик аппаратной части системы управления и может в какой-то степени повлиять на концепцию построения механических компонентов машины и конструкцию отдельных механизмов, то программист не может влиять на них.

Для успешной реализации такой цепочки закладывают избыточность в механизмы, а затем и в аппаратную часть системы управления. Программы, созданные для практически готовой машины, никогда не будут оптимальными и потеряют в краткости, надежности и быстродействии, что, в свою очередь, требует избыточности в аппаратной части.

Одновременное согласованное проектирование механических, электронных и программных компонентов оборудования исходя из заложенных в него процессов устраняет их избыточность, не реализованную в параметрах машины, а также позволяет сократить сроки разработки. Появляется возможность обоснованно выбрать и распределить функции различных компонентов машины, ввести помимо ее основной функции – реализации заданной технологии – ряд дополнительных, обеспечивающих ее безотказность, ремонтпригодность, надлежащую гибкость и др.

Кроме того, исходя из процессов, намеченных для реализации выбранных целей, можно будет разделить машину на функционально законченные автономные элементы с единым механическим, энергетическим и информационным интерфейсом, что позволяет отлаживать и проверять элементы отдельно, т. е. ускорить разработку.

Механические, электронные и программные компоненты машины сообща достигают поставленной цели, реализуя предписанный набор процессов в каждом из трех видов ресурсов (система исполнительных механизмов, система их энергообеспечения и система управления). На фоне общего технического прогресса явно выражена тенденция интенсификации применения и усложнения программного обеспечения, затем аппаратного оснащения (ресурсов) систем управления, систем энергообеспечения и, наконец, целевых механизмов. Важно на ранних стадиях проектирования рационально распределить функции между ресурсами различного рода и сформулировать четкие технические задания на них, чтобы повысить качество проектирования, распараллелить этапы проектирования и

ускорить его завершение. Это *концепция параллельной проработки компонентов машины* в противовес распространенной в настоящее время *концепции последовательной проработки*, когда сначала разрабатывается система целевых механизмов, затем система их энергообеспечения, ресурсы системы управления и лишь на последней стадии, когда машина практически готова, создается ее программное обеспечение.

Ресурсная и процессная модели технологической машины. Ресурсы во многом, но не полностью определяют протекающие в системе процессы, поэтому графическое отображение взаимосвязи элементов системы через материальные, энергетические и информационные потоки (ресурсная модель системы, ее структура) должно дополняться описанием не только процессов, протекающих в каждом из ее элементов, но и описанием взаимодействия этих элементов внутри структуры машины (процессная модель системы). Причем, чем более сложной и гибкой является структура машины, тем большее значение в ее описании приобретает процессная модель.

Например, в вычислительной машине используется шинная архитектура ресурсов, связи являются гибкими и микропроцессор может взаимодействовать с каждым из элементов структуры. Без четкого указания программного обеспечения (т. е. задания процессной модели) нельзя понять, что в настоящий момент делает ваш компьютер.

Ресурсная модель, согласно Единой системе технологической подготовки производства, постоянно уточняется при разработке машины. Начиная с технического предложения, ресурсная модель проходит стадии эскизного, технического и рабочего проектов и завершается рабочими чертежами и программами обработки отдельных деталей.

Также и процессная модель должна преследовать ряд целей как по расчету и уточнению принципиальных и конструктивных решений, так и по постановке технического задания и формулировке технического предложения на программное обеспечение. Процессная модель на стадии рабочего проекта должна завершаться отлаженным кодом программного обеспечения технологической машины.

Умение описывать взаимодействия элементов технологической машины различными способами – требование к современному разработчику.

Знания и умения, необходимые ведущему разработчику технологического оборудования. Исходя из изложенного выше, альтернативы комплексной проработке механических, электронных и программных компонентов технологического оборудования нет. В связи с этим крайне возрастает роль ведущего разработчика.

В настоящее время сформировалась новая профессия – *интегратор*, в задачи которого входит объединение механических и энергетических компонентов машины в единое целое для повышения удобства эксплуатации, качества и производительности различных систем, в том числе и технологических. Чаще всего функции интегратора выполняет инженер-системотехник, берущий за основу существующую систему и «приспосабливающий» к ней управляющую ЭВМ и другие микропроцессорные средства.

Опыт показывает, что наиболее успешными разработки оборудования бывают в том случае, если ведущий разработчик разбирается в современных средствах микропроцессорного управления настолько, что может на начальных этапах проектирования распределить функции между различными компонентами машины и четко поставить техническое задание и техническое предложение на реализацию программной и аппаратной части САУ. Получить эти знания, развить необходимые навыки и поможет данное пособие.

Цель пособия – дать начальный запас знаний и умений для изучения и освоения обслуживания современных систем управления оборудованием электронной техники.

ГЛАВА 1. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА И СТРУКТУРА САУ

1.1. Вариантность элементной базы САУ и возможности реализации различных функций

Выбранная элементная база определяет возможности САУ при реализации ее основной и дополнительных функций. Рассмотрим и проанализируем варианты построения САУ на примере САУ робота для перегрузки цветных кинескопов. Анализ различных вариантов будем вести в историческом аспекте, по мере возникновения различных средств для реализации систем управления. Конечно, многие рассматриваемые САУ в новых разработках применять не следует, но в данном случае важны побудительные причины, приведшие к возникновению рассматриваемых вариантов, их возможности по реализации различных функций, способы описания работы систем на той или иной элементной базе, тенденции развития систем управления.

Схема рассматриваемого технологического участка представлена на рис. 1.1. В печи 1 экранно-масочный узел (ЭМУ) и оболочка кинескопа склеиваются между собой специальным клеем и переставляются роботом 2 с ленточного выходного конвейера печи на непрерывно движущийся цепной конвейер. На этом конвейере проводится проверка качества шва склейки кинескопа. Далее кинескоп 3 поступает на участки заварки электронно-оптической системы (ЭОС) в горловину кинескопа и затем – на термовакуумную обработку. Одна печь склейки обслуживает несколько участков заварки ЭОС. Некачественно склеенные оболочки, проходя мимо участков заварки, должны поступать на регенерацию узлов. Задача робота 5 – забирать годные оболочки с непрерывно движущегося конвейера и переставлять их на дискретный конвейер-накопитель 6 участка заварки ЭОС.

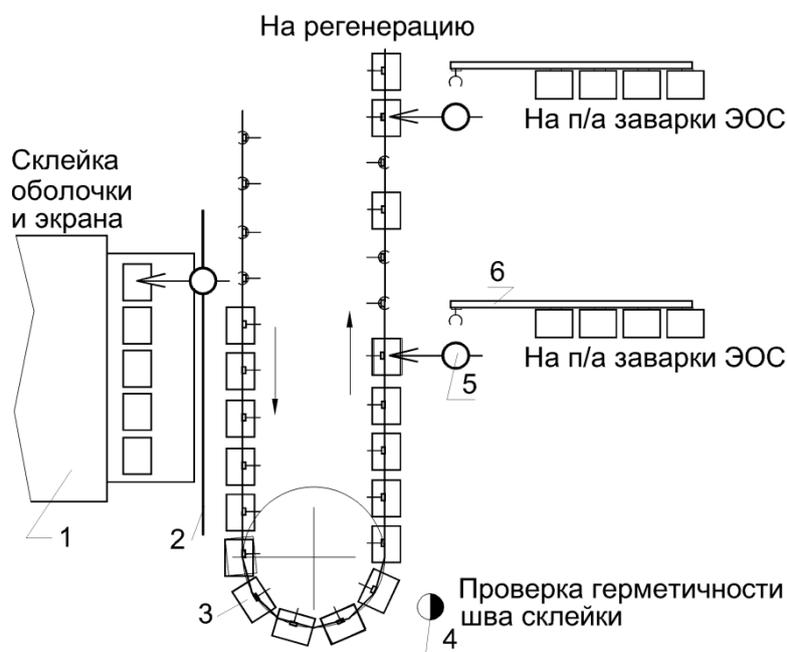


Рис. 1.1. Схема технологического участка склейки, заварки и термовакуумной обработки цветных кинескопов

Конструктивная схема робота-перегрузчика представлена на рис. 1.2. Робот забирает годный кинескоп 1 с подвески непрерывно перемещающегося цепного конвейера 2 и перегружает его на тележку 7 накопителя 8, которая доставляет его к операции очистки горловины и заварки электронно-оптической системы. Кинескоп захватывается вакуумной присоской 3, которая перемещается в горизонтальном направлении механизмом 4, а в вертикальном – механизмом 5. Поворот руки робота осуществляется механизмом 6. При движении кинескопа вместе с конвейером его горловина нажимает на пружинный щуп конечного выключателя, который формирует сигнал x_1 о наличии кинескопа в зоне захвата робота. Если на операции контроля клеевого шва экрана и конуса, которая осуществлена ранее, будет признано, что оболочка является браком, в горловину вставляется конус 10 из кальки (флажок). При этом в момент прохождения кинескопа вместе с

сигналом x_1 подается и сигнал x_2 . Таким образом сообщается, что в зоне загрузки находится бракованный кинескоп. Сигнал x_3 снимается с датчика наличия тележки на позиции загрузки адресного конвейера.

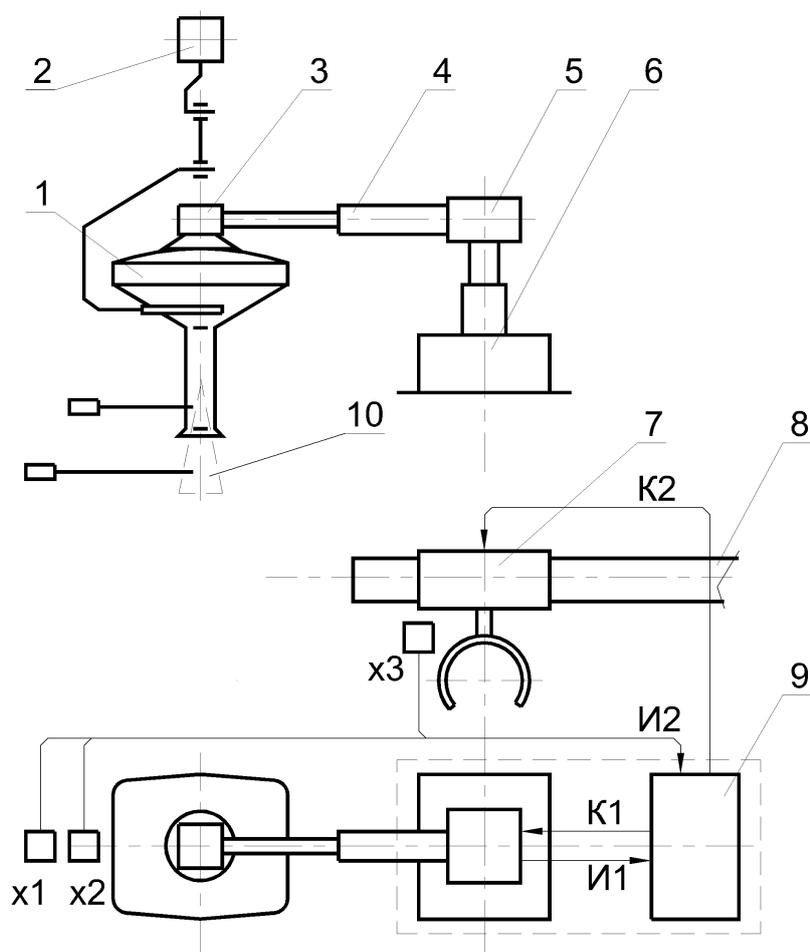


Рис. 1.2. Конструктивная схема робота-перегрузчика кинескопов

Управляет роботом САУ 9, которая на основе информации И2 о состоянии внешней относительно манипулятора среды и инфор-

мации И1 о состоянии его рабочих органов выдает команды K1 для управления приводами манипулятора и сигнал K2, формирующий, совместно с сигналом о наличии оболочки на тележке накопителя, команду на ее старт. Рассмотрим различные варианты исполнения САУ таким роботом.

САУ с механическим командоаппаратом (рис. 1.3) состоит из электродвигателя М, который через пару сменных шестерен передает вращение на распределительный вал, несущий кулачки 5–9, служащие приводом руки манипулятора. Кулачок 5 через рычажную систему или шариковый передаточный механизм перемещает манипулятор в горизонтальном направлении, а кулачок 6 – в вертикальном. Кулачок 7 поворачивает руку манипулятора, а кулачок 8 открывает клапан вакуумной присоски. Эти четыре кулачка задают команды K1 (обеспечивают привод руки манипулятора в нужной последовательности). Команда K2 на накопитель снимается с конечного выключателя, который включается и выключается кулачком 9.

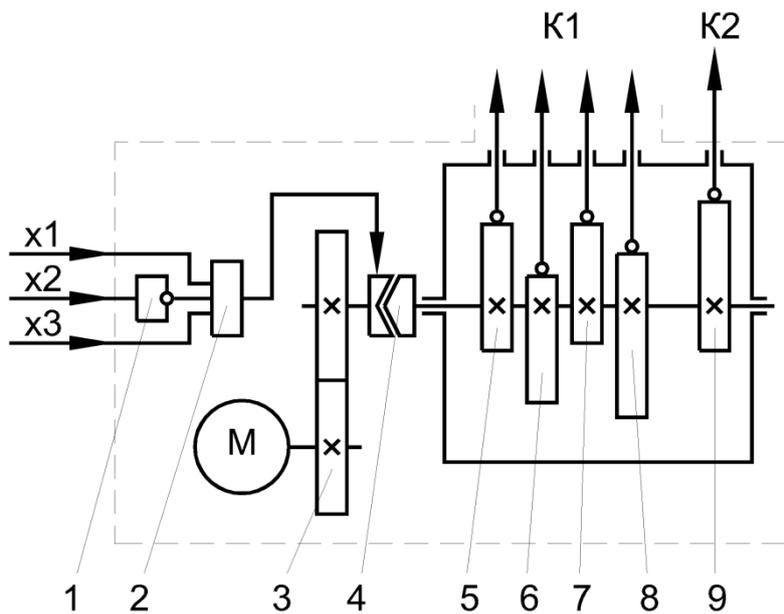


Рис. 1.3. САУ с механическим командоаппаратом

Вращение от двигателя на распределительный вал с кулачками передается через однооборотную муфту 4, которая после включения передает только один оборот и выключается. Сигнал x_2 через инвертор 1 и сигналы x_1 и x_3 подаются на ячейку И2, которая по сочетанию $x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot x_3$ формирует команду на включение однооборотной муфты. Однооборотная муфта здесь применена, чтобы не включать и не выключать в каждом цикле перегрузки достаточно мощный двигатель М.

Циклограмма, описывающая последовательность срабатывания отдельных механизмов манипулятора является исходным материалом для разработки профилей каждого из кулачков (рис. 1.4).

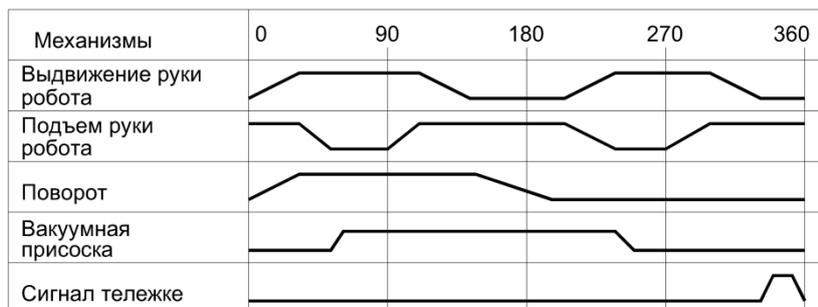


Рис. 1.4. Циклограмма работы робота

Рассмотренное устройство назвать роботом можно с большой натяжкой. Скорее всего, это – специальный автооператор. Основной его недостаток – сложность переналадки САУ, которая заключается в разработке, изготовлении и установке на распределительный вал новых кулачков.

Сложны в реализации и механизмы, передающие движение от профиля кулачков к рабочим органам робота. Для упрощения и унификации конструкций таких устройств были разработаны и широко использовались шариковые передаточные механизмы, представляющие собой набор шариков и втулок, вставленных в металлическую трубку и скользящих в ней. Трубку можно было изгибать в зависимости от положения рабочих органов. В некотором роде, это аналог гидравлического привода, но кинематически более точный.

Несмотря на трудности, связанные с переналадкой САУ, механические кулачковые системы благодаря их надежности и простоте еще долго будут применяться там, где частые переналадки не требуются. Такие системы в процессе управления не нуждаются в большом объеме входной информации, одновременно выполняют роль привода, но могут реализовать лишь жесткий синхронный цикл работы.

САУ с пневмомеханическим командоаппаратом (рис. 1.5) имеет отдельные исполнительные механизмы и систему управления. Перемещения руки робота осуществляется пневмоцилиндрами,

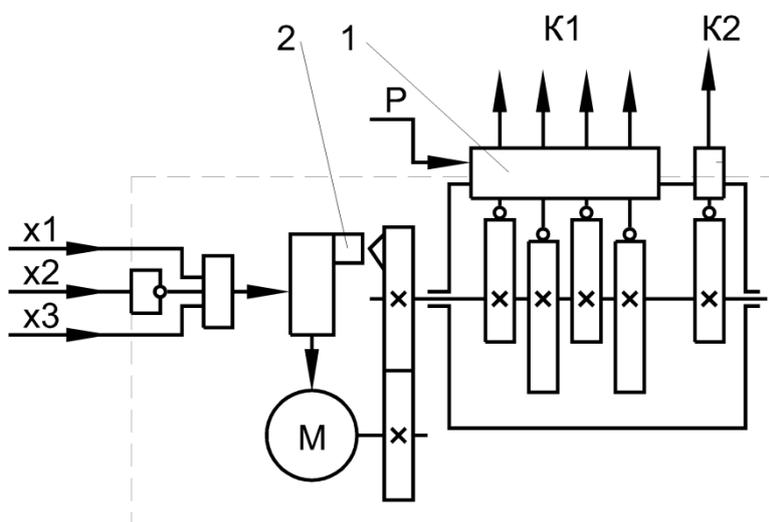


Рис. 1.5. Система управления с пневмомеханическим командоаппаратом

воздух в которые подается через пневмоклапаны 3, управляемые кулачками распределительного вала. Поскольку кулачки уже не являются приводом, нагрузка на них и на распределительный вал существенно уменьшается. Двигатель со встроенным редуктором М гораздо менее мощный и может запускаться и останавливаться в каждом цикле перегрузки конечным выключателем 2. Кулачок такой САУ не несет больших нагрузок и делается сборным со сменными профилями (рис. 1.6): толкатель клапана 1 скользит по смен-

ным регулируемым сегментам 3, закрепленным на диске 4 с помощью винтов 2.

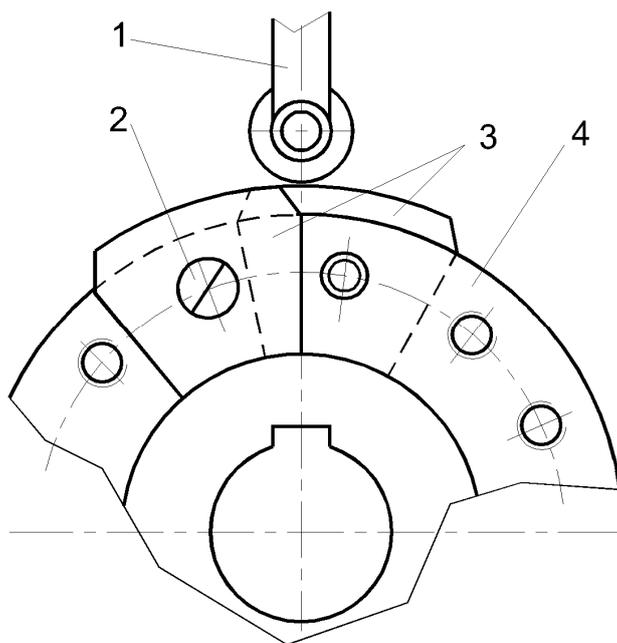


Рис. 1.6. Кулачок пневмомеханического командоаппарата

Переналадка пневмомеханической САУ занимает уже не несколько смен, как в предыдущем случае, а несколько часов и даже минут. Такая система применена в промышленном роботе ПР5-2, который серийно выпускали в 70–80-е годы прошлого века. Сейчас такие системы управления в новых разработках не используют, но отдельные устройства пневмомеханики применяют достаточно широко.

САУ с электропневмомеханическим командоаппаратом (рис. 1.7) оснащена электромагнитными пневмоклапанами. Кулачки воздействуют на конечные выключатели 5, которые, в свою очередь, включают электромагнитные пневматические клапаны. Нагрузки на кулачки здесь еще меньше, поэтому их делают наборными из сухариков 6, перемещающихся в Т-образных пазах, нарезанных по образующей распределительного вала 7. Такая САУ за-

рекомендовала себя, как достаточно надежная и простая. На перепрограммирование цикла требуется всего несколько минут. Двигатель 3, как и в прежних системах, продолжает запускаться сигналом $x1 \cdot x2 \cdot x3$, который выдают логические ячейки 1, 2, и останавливается сигналом конечного выключателя 4.

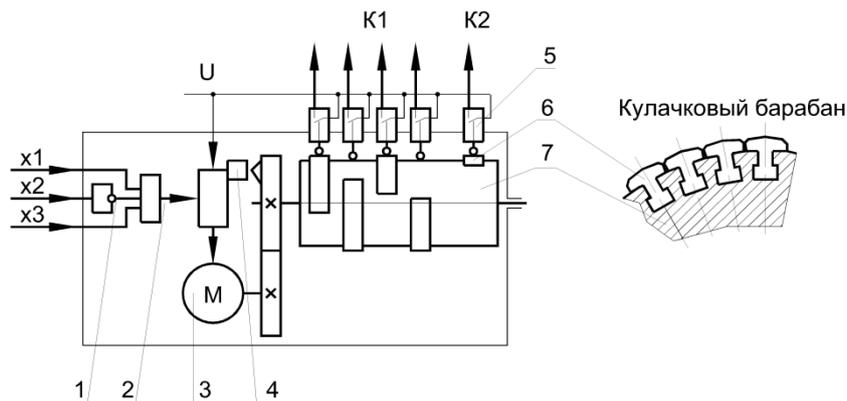


Рис. 1.7. Электропневмомеханический командоаппарат

Использование электрического сигнала для управления клапанами увеличило возможности САУ. Так, сигнал о том, что кинескоп бракованный можно вводить и обрабатывать в цепях управления клапанами и тем самым добиться того, чтобы бракованный кинескоп тоже разгружался, но в другую зону. Цикл управления такой системы также является жестким и синхронным. Его длительность задается частотой вращения двигателя.

Система, как и ранее рассмотренные, не может реализовать потенциальные возможности приводов по быстродействию, поскольку момент окончания каждого перемещения не фиксируется. Время на каждую операцию при разработке циклограммы выбирается с таким запасом, чтобы операция с достаточной вероятностью окончилась бы даже при пониженном давлении в пневмосети, при утечках в пневмоцилиндрах, некачественной смазке и т. д.

САУ на жесткой логике. Если снабдить каждый привод датчиками положений рабочих органов, можно будет фиксировать завершение операций и тем самым повысить быстродействие системы. В качестве датчиков в данном случае можно использовать

конечные выключатели или герконы (герметичные контакты, управляемые магнитным полем). Суть САУ на жесткой логике в том, что последовательность работы объекта зашита в схеме, обрабатывающей сигналы и выдающей команды на приводы. Эта схема может быть собрана на контактно-релейных компонентах или на интегральных схемах малой степени интеграции.

На рис. 1.8, *а* показано расположение датчиков рассматриваемого робота. Анализируя сигналы с датчиков положения руки X , система управления должна выдавать команды Y на соответствующие приводы. При этом возможны два варианта.

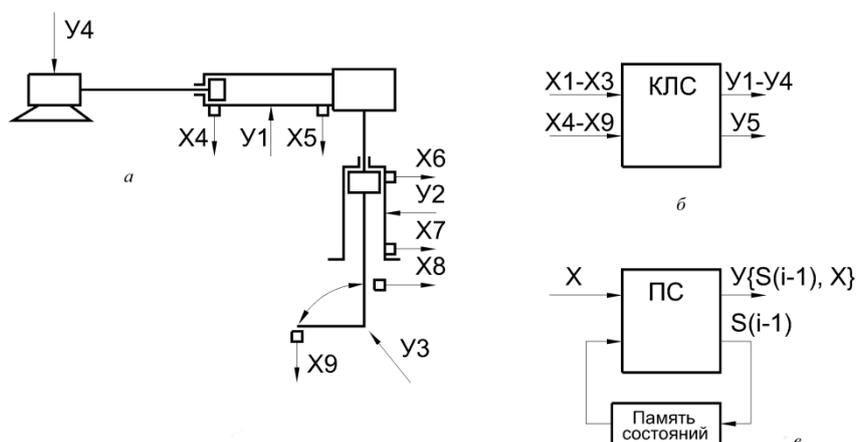


Рис. 1.8. Робот-перегрузчик с обратными связями:

а – функционально-кинематическая схема робота; *б* – схема САУ роботом как комбинационная логическая схема; *в* – схема САУ роботом как последовательностная схема

В первом варианте (рис. 1.8, *б*) команды Y зависят только от присутствующих в рассматриваемый момент сигналов X . Тогда САУ представляет собой комбинационную логическую схему (КЛС).

Во втором варианте (рис. 1.8, *в*) команды, выдаваемые в каждом такте управления, зависят как от присутствующих сигналов, так и от состояния системы S_{i-1} , где i – номер такта управления. Такие схемы называются последовательностными. Они могут помимо обеспечения асинхронного быстродействующего цикла вы-

полнять ряд сервисных функций по диагностике отказов и выявлению причин неисправностей.

При равном количестве входных сигналов последовательностные схемы обеспечивают больший диапазон реакций, чем комбинационные. Имеющегося в нашем примере комплекта сигналов не достаточно для построения САУ как КЛС. Например, входному набору $x_1 = 1, x_2 = 0, x_3 = 1, x_4 = 0, x_5 = 1, x_6 = 1, x_7 = 0, x_8 = 1, x_9 = 0$ (годный кинескоп присутствует на позиции, есть тележка накопителя, рука робота вытянута, поднята и повернута к накопителю) может соответствовать два набора команд, приведенных в таблице.

у1	у2	у3	у4
1	1	1	0
1	0	0	1

Номера команд в таблице соответствуют обозначениям на рис. 1.8, а. Набор в верхней строке таблицы означает поворот к конвейеру с выдвиганием поднятой руки робота при начале нового цикла, в нижней строке – опускание выдвинутой руки робота при разгрузке кинескопа в тележку накопителя. Дело в том, что появление очередного кинескопа в зоне загрузки, пока цикл перегрузки еще не окончен, вполне возможно и даже весьма вероятно, поскольку разгрузка с конвейера на реальных технологических линиях по производству цветных кинескопов осуществляется тремя последовательно установленными у конвейера роботами. Какой сигнал нужно добавить, чтобы для управления применить КЛС?

Последовательность работы КЛС описывают таблицей истинности (рис. 1.9), определяющей соответствие входных X и выходных Y сигналов. Эта таблица является основой разработки КЛС. Задача инженера-механика определить требуемую циклом управления таблицу, а инженера-схемотехника – разработать соответствующую ей схему.

Для описания работы последовательностных схем применяют граф переходов и таблицу выходов. Задать описание работы – задача инженера-механика. Начинают с выделения типовых состояний объекта управления. Граф переходов и таблицу выходов затем несколько раз преобразуют к виду, удобному для схематической реализации с целью последующей разработки электрической схемы САУ. Это уже задача инженера-схемотехника.

Описание работы схемы должно быть наиболее ясным и наглядным, позволяющим легко проследить работу объекта.

За основные состояния объекта удобно принять те состояния, которые соответствуют промежуткам времени, в течение которых на выходах схемы присутствует неизменный набор команд. Примем следующий набор основных состояний:

0 – исходное состояние робота, с поднятой и втянутой рукой, повернутой в сторону накопителя; он ожидает сигнала о наличии годного кинескопа и тележки накопителя;

1 – старт загрузки – выдвижение руки и поворот к конвейеру (Выдв*Пвр);

2 – опускание повернутой и выдвинутой руки на кинескоп (Опск);

3 – включение вакуумной присоски и задержка времени на захват (Здрж*Прс);

4 – подъем руки робота (Пдм);

5 – втягивание поднятой руки с кинескопом (Втг);

6 – поворот руки к накопителю (Пвр);

7 – выдвижение руки (Выдв);

8 – опускание руки (Опск);

9 – напуск воздуха в присоску, подъем руки и ее втягивание, выдача команды на старт тележки У5 (Втг*Пдм*Прс).

Автоматный граф робота-перегрузчика и таблица его состояний, содержащая перечень выдаваемых в каждом из состояний робота команд, приведены на рис. 1.9. Кружками на графе обозначены

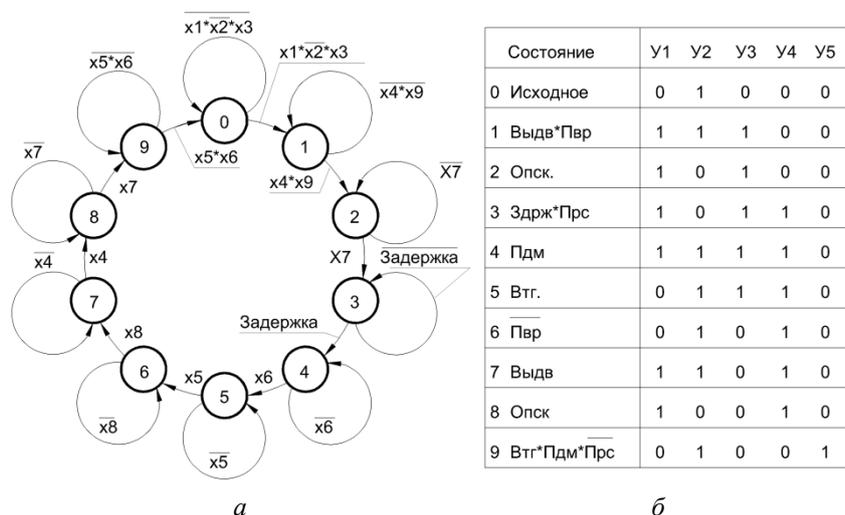


Рис. 1.9. Граф переходов (а) и таблица выходов САУ роботом (б)

состояния, стрелками – переходы. Рядом с каждой стрелкой указано условие перехода.

Приведенный граф является упрощенным, он показывает только реализацию функций управления рабочим циклом робота. В каждом состоянии анализируется ограниченный набор сигналов. Граф можно дополнить аварийными состояниями, если в каждом из основных состояний расширить анализируемый набор состояний и выявлять аварийные ситуации. Хорошо проработанный граф должен отличаться полнотой анализа ситуаций, непротиворечивостью переходов – одни и те же ситуации не должны вести к разным состояниям, не должно быть тупиковых состояний. Необходимо предусматривать пошаговую отработку команд для реализации режима наладки. Особое внимание следует обращать на процесс выключения робота. Ординарное (неварийное) выключение робота необходимо производить в исходном состоянии, чтобы при включении он не выполнял никаких движений, переходя в исходное состояние.

САУ на жесткой логике применяют для управления объектами, когда переналадка не нужна или незначительна и может быть реализована без схемных изменений. В настоящее время САУ на жесткой логике все более вытесняются простыми микропроцессорными контроллерами, для программирования которых используют языки, построенные на основе автоматных графов, или языки контактно-релейных схем. Позже рассмотрим пример использования такого контроллера, а пока продолжим рассматривать варианты реализации САУ роботом в историческом аспекте их появления и развития.

САУ со штекерной панелью. На следующем этапе развития основной проблемой являлось перепрограммирование контактно-релейных схем и для устранения этих трудностей были разработаны САУ со штекерной панелью (рис. 1.10).

Основой схемы САУ является генератор импульсов, вырабатывающий прямоугольные импульсы с заданной частотой. По функциональному назначению он эквивалентен двигателю САУ с командоаппаратом (см. рис. 1.3). Счетчик СТ предназначен для счета этих импульсов. Он обнуляется и иницируется сигналом низкого уровня, подаваемым с инвертирующего выхода D-триггера на вы-

вод R . Ко входу D-триггера подключена уже известная из других рассмотренных схем цепочка из инвертора и ячейки И, формирующая сигнал $x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot x_3$.

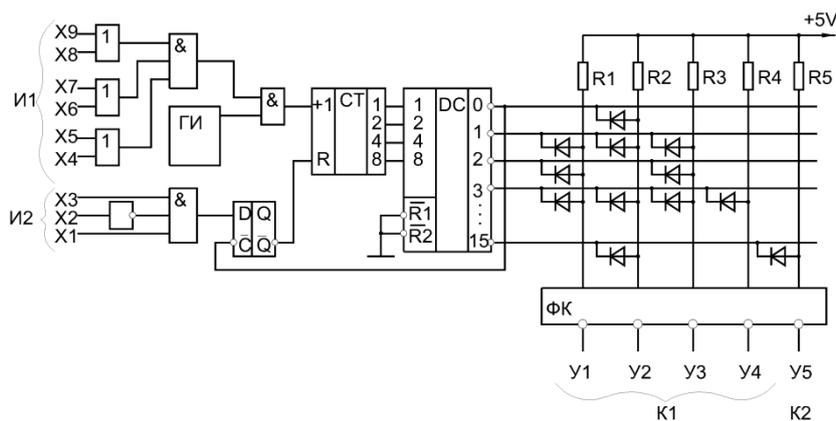


Рис. 1.10. САУ со штекерной панелью

Информация записывается в D-триггер, если счетчик находится в нулевом состоянии. Выходы счетчика подключены к дешифратору DC «один из шестнадцати», который в зависимости от приходящего на его вход двоичного числа заземляет соответствующий выход (устанавливает на нем логическое состояние 0), поддерживая на остальных сигналах высокий уровень.

Выходы дешифратора образуют горизонтальные шины штекерной панели, вертикальные шины подключены к формирователю команд Y_1 – Y_5 , подающему их на соответствующие механизмы. При счете горизонтальные шины последовательно заземляются и через диоды подаются соответствующие команды на механизмы манипулятора, что эквивалентно вращению распределительного вала САУ с командоаппаратами. Однако «двигатель» здесь безынерционен и может оперативно включаться и выключаться на каждую шестнадцатую долю «оборота». Для этого служит ячейка И, подключенная к счетному входу +1 счетчика СТ. Если в какой-либо паре конечных выключателей X (см. рис. 1.8, а) оба окажутся разомкнуты, то это означает, что соответствующее элементарное перемещение не окончено, импульс на счетчик не пройдет и система не

перейдет в следующее состояние. Таким образом, можно строить асинхронные циклы управления.

В штекерной панели программирование выполняется установкой в узлы горизонтальных и вертикальных шин штекеров, замыкающих шины через диоды. Диоды нужны для того, чтобы запретить передачу нуля от вертикальных шин панелей к горизонтальным.

САУ со штекерной панелью вобрала в себя все лучшие качества предыдущих систем, но их наиболее слабым звеном являются электрические контакты панели. В качестве контактов использовались и микровыключатели, и герконы, но наибольшее распространение получили сменные платы с впаянными диодами. Для перепрограммирования необходимо было заменить плату или перепаять диоды.

САУ с электронной памятью. Роль штекерной панели может с успехом выполнять электронная память, оперативная либо репрограммируемая. Структурная схема САУ с репрограммируемым постоянным запоминающим устройством (РПЗУ) приведена на рис. 1.11 и состоит из трех основных блоков: БУП – блока управления памятью; БП – блока памяти; ФК – формирователя команд и генератора импульсов – ГИ. Если внимательно посмотреть на предыдущую схему на рис. 1.10, то можно выделить те же блоки, только роль памяти выполняет штекерная панель. Здесь же ее заменяет одна БИС (например, К573РФ2). Это РПЗУ со стиранием информации ультрафиолетовым излучением емкостью 2048 байт = 2 КБ или 2048 восьмиразрядных слов (байт).

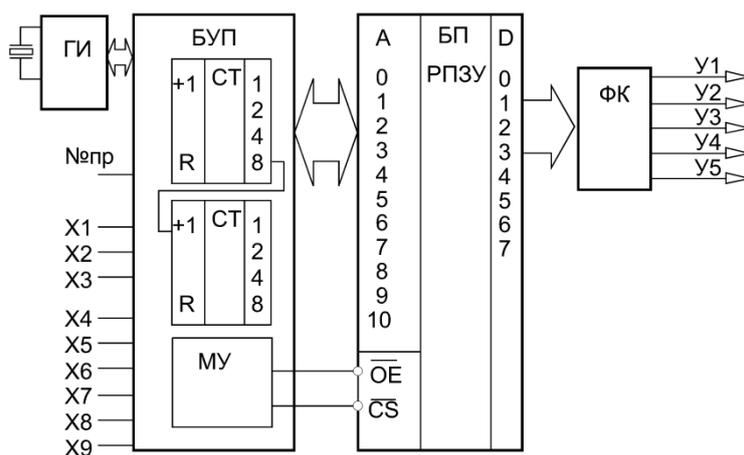


Рис. 1.11. САУ с электронной памятью

Если на вход адресов через шину A подать адрес слова памяти, а на вход управления по линии CS (Chip Select) сигнал активизации схемы, а затем с некоторой задержкой – разрешение выхода OE (Output Enable), то на выходе появится содержание адресуемого восьмиразрядного слова. Оно поступит в регистр формирователя команд и после преобразования (усиления) – на соответствующие механизмы робота. Формирует сигналы CS и OE модуль управления (МУ).

Если на одну программу тратить 64 управляющих слова (в предыдущей САУ обходились 16), то в РПЗУ можно разместить до 32 различных программ. Блок управления памятью по входу «номер программы» (№пр) выбирает адрес начала одной из 32 зон, в которых размещены управляющие программы, точнее слова, затем последовательно увеличивает адреса управляющих слов, выдавая их на формирователь команд. Тактируется этот процесс, как и в предыдущей схеме, генератором импульсов (ГИ).

САУ с РПЗУ помимо выполнения рабочего цикла могут реализовать ряд сервисных функций, например диагностику неисправностей; пошаговый режим работы; автоматический выбор требуемой программы.

Подобные системы управления широко применяли в свое время. Благодаря их простоте, высокой надежности, относительно широким возможностям они постепенно вытеснили САУ на жесткой логике и со штекерной панелью, но впоследствии были вытеснены микропроцессорными САУ.

САУ на основе микропроцессора. Такие системы обладают наиболее широкими возможностями по реализации различных функций САУ. Если во всех предыдущих системах использовали цикловой принцип управления, когда САУ выдает команды на очередность перемещений, а само перемещение ограничивается механическими упорами, то здесь можно широко варьировать положения точек позиционирования, можно организовать перемещение руки робота по сложному контуру, проводя одновременно контроль на герметичность, и затем – перегрузку, маркировку брака, выявление брака по маркировке с помощью систем технического зрения и т. п. Ограничения на функции управления при использовании микропроцессоров чаще всего обусловлены не возможностями САУ и не возрастающей при увеличении числа функций стоимостью, а возможностями приводов и исполнитель-

ных механизмов и уровнем квалификации разработчиков. Об этом кто-то метко сказал: «Ничто не развивается столь быстро и не дешевеет столь интенсивно, как средства вычислительной техники. Если бы автомобили последние 40 лет вели себя так же, они стоили бы сейчас не дороже пачки сигарет и летали быстрее реактивного лайнера».

Структурная схема САУ роботом на микропроцессорной основе представлена на рис. 1.12. Система состоит из трех основных

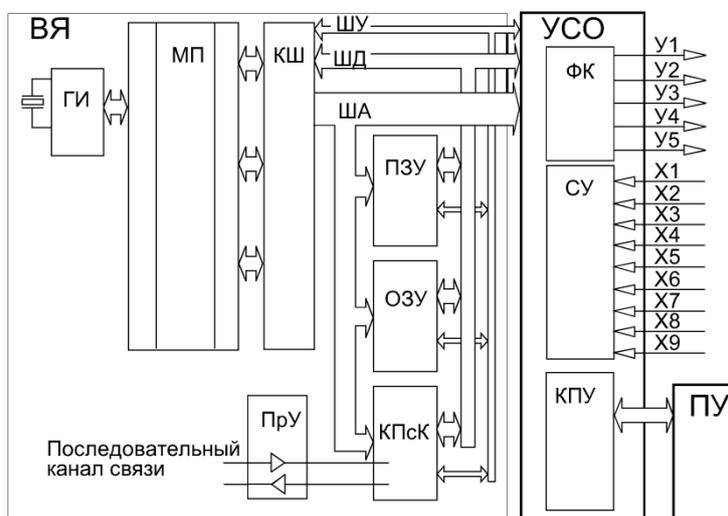


Рис. 1.12. САУ на основе микропроцессора

блоков: микроЭВМ или вычислительного ядра ВЯ, устройства связи с объектом УСО и пульта управления ПУ. Вычислительное ядро предназначено для обработки информации под управлением программного обеспечения и включает в себя микропроцессор МП, тактовый генератор ГИ и контроллер шин КШ. Через шины управления ШУ, шины данных ШД и шины адресов ША МП обслуживает постоянное запоминающее устройство ПЗУ, оперативное запоминающее устройство ОЗУ, контроллер последовательного канала связи КПсК с преобразователем уровня ПрУ для связи с централизованной системой управления верхнего уровня. Для работы в реальном времени необходимы таймеры и контроллер

прерываний для реакции на внешние события (на рис. 1.12 не показаны). Каждое из устройств имеет свой адрес, при подаче которого на шину адресов оно подключается к шине данных, и в зависимости от сигнала на шине управления начинает прием или передачу в программном режиме обмена. Таким образом, ВЯ оказалось достаточно развитым устройством с несколькими десятками отдельных интегральных схем.

УСО состоит из согласователя уровня СУ для приема сигналов дискретного контроля, формирователя команд ФК для выдачи сигналов дискретного управления и контроллера пульта управления КПУ. Пульт управления предназначен для отображения информации о состоянии робота и ручного перепрограммирования цикла его работы.

В постоянном запоминающем устройстве ПЗУ целесообразно хранить неизменную часть программного обеспечения (ПО), в ОЗУ, называемом в управляющих системах памятью данных, – его переменную часть. Неизменная часть ПО состоит из ряда программ, выполняющих заданные функции САУ, и центрального ядра – диспетчера, обеспечивающего запуск требуемых процессов в нужные моменты.

Программы рабочих циклов хранятся в ОЗУ, чтобы можно было их изменить в целях обеспечения универсальности робота и возможности его работы на различных участках технологической цепочки изготовления изделий. Рассмотрим учебный пример рабочей программы, состоящей из стартовой таблицы, размещаемой в начале ОЗУ, под которую выделен фиксированный объем памяти. В этой таблице хранятся стартовые адреса рабочих программ.

Рабочая программа состоит из шагов, каждый из которых кодируется тремя словами – байтами. Первый байт содержит набор команд: каждая команда У кодируется соответствующим битом; второй байт содержит маску – требуемое состояние датчиков робота после исполнения заданных команд; в третьем байте закодирована задержка времени после отработки очередного шага. Заканчивается программа тремя нулевыми байтами.

САУ выполняет следующие функции: выбор режима работы; программирование в режиме ручного управления; пошаговое исполнение; автоматическое исполнение запрошенной программы цикла; диагностика причин при отказах; тестирование программного обеспечения ПЗУ. К этим функциям можно отнести связь с ЭВМ верхнего уровня для автоматического перепро-

граммирования рабочего цикла, сообщения об отказах и их причинах и др.

Режим программирования цикла при ручном управлении обеспечивает запись в ОЗУ конкретных шагов управляющих программ после их отработки по командам с пульта. Кроме программирования здесь осуществляется сжатие информации в ОЗУ – заполнение пустых мест после удаления программ. Если для описания работы САУ на механической основе достаточно циклограммы, САУ на жесткой логике – графа переходов и таблицы выходов, то для описания работы САУ на микропроцессорной основе необходимы более мощные средства, поскольку и возможности системы гораздо шире. Работу микропроцессорных САУ описывают алгоритмами различной степени детализации.

Схема алгоритма режима автоматического исполнения приведена на рис. 1.13. Начинается алгоритм с цикла выявления годного кинескопа на позиции загрузки, затем по заданному номеру программы находится стартовый адрес М и следует пошаговое исполнение рабочего цикла. Если состояние датчиков не будет

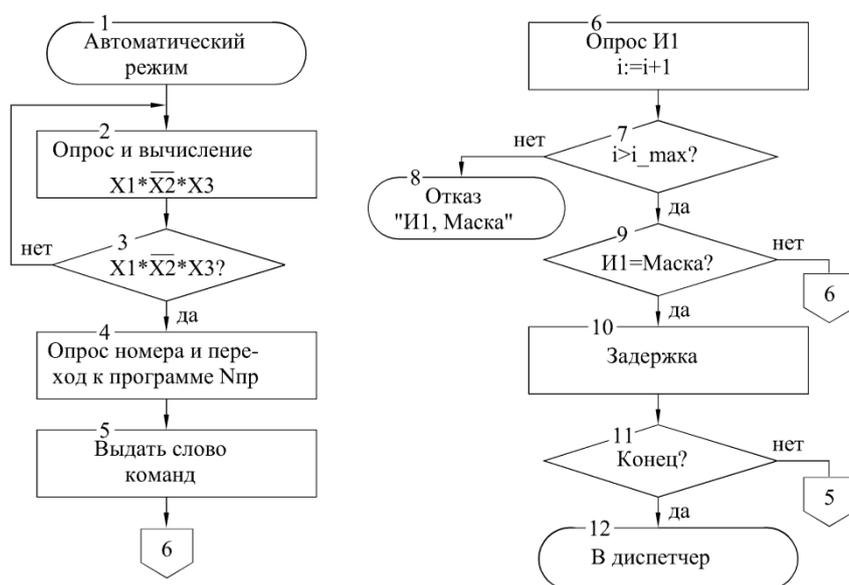


Рис. 1.13. Блок-схема алгоритма автоматического исполнения

соответствовать требуемому (маске) после определенного числа циклов опроса, следует сообщение об отказе, выдача маски и состояния датчиков. Эта информация выявляет отказавший датчик или привод. После отработки шага следует задержка на заданное в программе время, проверка на три нулевых байта (признак конца), окончание цикла или переход к следующему шагу. При окончании цикла управление передается диспетчеру задач.

Особенность программного обеспечения систем управления на основе микропроцессоров заключается в том, что работа системы описывается как совокупность параллельно протекающих и взаимодействующих последовательных процессов или потоков. Подробнее состав управляющих программ и связанные с этим термины и понятия будут рассмотрены в разделе 1.4.

САУ на однокристалльных микроконтроллерах. Типовой однокристалльный микроконтроллер в одной БИС содержит вычислительное ядро (ВЯ), тактовый генератор, память программ и данных, программируемые таймеры, приемопередатчик по последовательному каналу, средства формирования и поддержки внешних шин и программируемые порты для контроля и управления объектом. Это практически законченная микроЭВМ.

Конечно, возможности схемы гораздо скромнее, чем возможности микроЭВМ на универсальном микропроцессоре; но их вполне достаточно, чтобы сделать САУ для простого робота, подобного рассмотренному выше, а стоимость системы будет на порядок меньше при одновременном увеличении надежности. Нарботка однокристалльных микроконтроллеров на отказ составляет десятки тысяч часов.

Структурная схема САУ приведена на рис. 1.14. В системе использован однокристалльный микроконтроллер К1816ВЕ51 с ОЗУ в 128 байт и РПЗУ в 4 Кбайт. Конечно, ОЗУ очень мало, несколько программ управления придется разместить в РПЗУ и отказаться от оперативного перепрограммирования, но все остальные функции можно оставить даже в таком минимальном аппаратном исполнении. Сигналы с датчиков приходят в порт P0, с порта P1 снимаются сигналы на формирователь команд ФК, к порту P2 подключен пульт управления, а микроконтроллер осуществляет его анализ и индикацию. К входам С1 и С2 подключен кварцевый резонатор, обеспечивающий стабильную работу внутреннего тактового генератора.

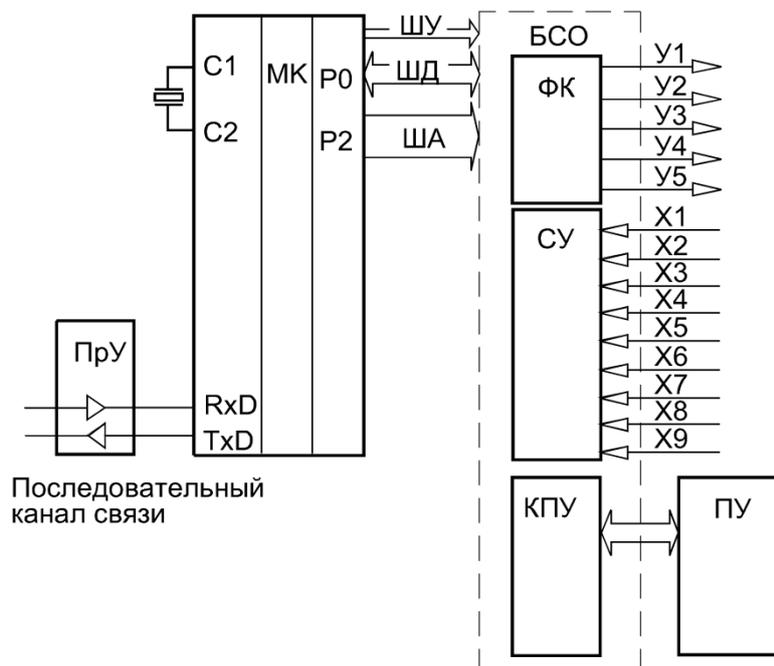


Рис. 1.14. САУ на однокристальном микроконтроллере

Таким образом, для САУ работа перегрузки кинескопов были рассмотрены восемь принципиально различных вариантов аппаратной реализации, применявшихся ранее и применяемых в настоящее время. Каждый из вариантов может реализовать различные **целевые функции** при осуществлении рабочего цикла, **сервисные функции**, направленные на наилучшую организацию целевой функции и **функции коррекции цели**.

По реакции на входные воздействия система управления может представлять собой **комбинационную логическую схему** либо **последовательностную схему**, когда выход определен не только входными сигналами, но и предыдущим состоянием системы.

Описать работу САУ можно **циклограммой**, если она реализует синхронные циклы управления, **автоматным графом** либо **блок-схемой алгоритма управления**.

Задача инженера-механика – определить уже на первых этапах проектирования функции и элементную базу САУ проектируемой

машины или системы машин с тем, чтобы заложить в ее структурно-компоновочное решение возможности полной реализации этих функций.

Контрольные вопросы

1. Назовите реализуемые функции и методы описания работы для механических, пневмомеханических и электропневмомеханических САУ.
2. Перечислите реализуемые функции и методы описания работы САУ на жесткой логике (контактно-релейных САУ).
3. САУ со штекерной панелью. Сравните функции, методы описания работы.
4. Каковы функции и методы описания работы САУ с электронной памятью?
5. Каковы функции и методы описания работы микропроцессорных САУ?
6. Опишите работу программного обеспечения микропроцессорной САУ для управления роботом.
7. Перечислите функции и методы описания САУ на однокристалльных микроконтроллерах.
8. Сравните способы описания работы САУ.

1.2. Этапы внедрения вычислительной и микропроцессорной техники в САУ технологическим оборудованием

Период эпизодического применения ЭВМ. Машина-дом. Созданные в сороковые годы прошлого столетия первые ламповые вычислительные машины были громоздки, ненадежны, потребляли много энергии и, что вполне естественно, применялись для целей управления лишь эпизодически, только для уникальных объектов, таких как атомные электростанции, гидроэлектростанции и т. п. Применялись ЭВМ чаще всего для контроля за действиями локальной автоматики и оператора и непосредственно объектом не управляли [2]. Появился даже специальный термин – управление off line. Но даже первые, подчас неуклюжие, попытки обрабатывать информацию для целей управления техническими объектами показали перспективность и эффективность этого направления. По времени реакции на событие оператор не мог соперничать с ЭВМ

и все дело было только в повышении надежности и снижении стоимости и габаритов.

Период серийного применения ЭВМ. Машина-шкаф. Созданием ЭВМ на дискретных полупроводниковых приборах с памятью на ферритовых кольцах озаменовались 50–60-е годы прошлого века. Вычислительная машина из отдельного здания «перебралась» в шкаф или стол. В это время появляются первые специализированные управляющие вычислительные машины, созданные не для проведения числовых расчетов, а для обработки информации с объекта управления и выработки управляющих воздействий. За рубежом фирма DEC разработала и выпустила управляющую ЭВМ PDP-8, в СССР появился ее аналог «Электроника 100-И», в которой была заложена и реализована идея шинной организации вычислительной машины, а также идея сверхоперативной памяти (по сути, – регистров общего назначения будущего микропроцессора). Начали серийно выпускаться ЭВМ «Киев-67» и «Киев-70», предназначенные специально для управления оборудованием электронных технологий.

Период массового применения ЭВМ. Одноплатная ЭВМ. В конце 60-х – начале 70-х годов прошлого века появились большие интегральные схемы (БИС). В 1974 г. фирмой Intel был изготовлен первый «настоящий» микропроцессор 8080, в который были заложены основы микропроцессорной архитектуры: набор регистров, типовая система команд, векторные прерывания, прямой доступ в память. За рубежом и чуть позже в Советском Союзе были запущены в серийное производство одноплатные ЭВМ: LSI-11 фирмы DEC, «Электроника-60М», «Электроника MC1201.02» и др., появился ряд новых микропроцессоров. Микропроцессоры серии K1801BM1 и его модификации аккумулировали в себе последние достижения того времени: 16-разрядную шину данных, набор из 8 универсальных 16-разрядных регистров общего назначения, каждый из которых мог выполнять функции счетчика команд. Мощная система команд с многообразием средств адресации позволяла эффективно использовать адресное пространство и размещать коды команд и критичные данные в РПЗУ или энергонезависимом ОЗУ так, что при выключении питания управляющая программа не пропадала и практически не требовала перезагрузки. Это был период накопления и реализации опыта разработки аппаратной и программной части САУ.

Были запущены в серийное производство первые специализированные управляющие контроллеры, объединившие в себе вычислительное ядро на основе какой-либо одноплатной ЭВМ и комплектующее по требованиям заказчика устройство связи с объектом (УСО).

Для нужд оборудования электронных технологий с начала 1980-х годов серийно выпускали достаточно компактные контроллеры «Орион 3», «Орион 4», «Орион 5» и УТК-5, имевшие, по тогдашним меркам, развитый человеко-машинный интерфейс на основе клавиатуры и дисплея и набираемое пользователем из серийно выпускаемых плат УСО. Каждая плата была рассчитана на прием и выдачу стандартизированных дискретных и аналоговых сигналов контроля и управления с программной и аппаратной инициализацией работы (ДУ, ДК – дискретное управление, контроль; АУ, АК – аналоговое управление, контроль).

Период распределенных САУ. Однокристалльная ЭВМ или микроконтроллер. В начале 80-х годов прошлого века были разработаны и серийно выпущены БИС и СБИС, содержащие на одном кристалле законченное вычислительное ядро САУ и элементарные средства связи с объектом. Фирмой Intel были выпущены макроконтроллеры семейства MCS-48, MCS-49 и, наконец, семейства MCS-51, ставшие в некотором роде эталоном универсального восьмиразрядного микроконтроллера. Стоимость микроконтроллеров этого семейства составляет несколько долларов. Они выпускаются и используются в новых разработках САУ до настоящего времени.

Множество фирм поддержало это направление работ. Так, фирма Motorola выпустила микроконтроллеры семейства MC68HC11, отличающиеся наличием аналого-цифрового преобразователя на кристалле и более развитой системой поддержки работы микроконтроллера в реальном времени. Микроконтроллер содержал на кристалле многоканальный программируемый таймер, в более поздних разработках фирмы эта система заслуженно получила название процессора реального времени.

В этот период на рынке появился ряд различных управляющих контроллеров и средств их адаптации под конкретные требования оборудования:

– универсальные отладочные комплекты на основе различных микроконтроллеров, содержащие ВЯ, средства его подключения к управляющей сети и инструментальной ЭВМ для оперативного

программирования, УСО и монтажную панель, позволяющие оперативно создавать компактные встроенные в объект системы его энергообеспечения и управления;

- специализированные интегрированные встроенные контроллеры, на которых в одном устройстве совмещались вычислительное ядро, УСО и система энергообеспечения объекта; как правило, это локальные регуляторы, управляющие типовыми технологическими процессами (нагрев, регулируемый привод);

- программируемые логические контроллеры (ПЛК);

- центральные и узловые контроллеры, основанные на архитектуре IBM PC и содержащие одноплатное вычислительное ядро и набор комплектующих заказчиком плат связи с объектом и плат энергообеспечения его элементов.

Были разработаны архитектурные решения вычислительно-управляющих сетей, общая концепция открытой архитектуры, применимая к широкому классу информационных технологий.

Очень трудно делить наше время на периоды, но все же следует назвать период эволюционного взрыва средств цифровой обработки информации *периодом изобилия*. Далее будем подробно изучать и пытаться классифицировать появившиеся и постоянно появляющиеся на рынке средства обработки информации.

1.3. Микроконтроллер – основная структурная единица аппаратного обеспечения САУ

Подобно структуре технологической машины, рассмотренной во введении, развитая система автоматического управления строится иерархически, как вычислительно-управляющая сеть. Выполнение общепринятых принципов построения открытых сетевых систем придает гибкость системе в аппаратном и программном плане, дает возможность наращивать систему с минимальными изменениями, накапливать опыт построения систем и широко использовать его в новых разработках, позволяет заимствовать аппаратные и программные решения сторонних производителей.

Основной структурной единицей аппаратного построения САУ является *микроконтроллер* (МК) (рис. 1.15). Его назначение – обработка поступающей информации и выдача управляющих воздействий для реализации совокупности возложенных на

САУ функций. В состав развитого микроконтроллера входит **вычислительное ядро (ВЯ)**, непосредственно обрабатывающее поступающую информацию и организующее обмен с элементами объекта управления. Сервис ВЯ при вводе и выводе информации от оператора оказывают **человеко-машинный интерфейс и система ввода-вывода**. Это обычно монитор, клавиатура, мышь и средства связи с ними, которые часто входят непосредственно в состав ВЯ.

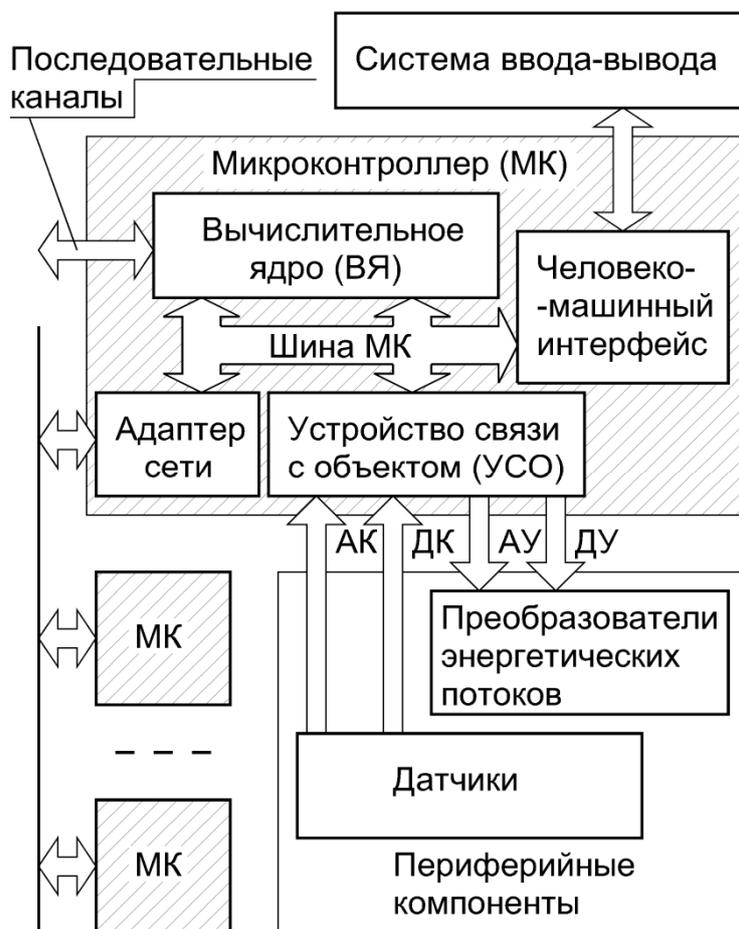


Рис. 1.15. Функциональная схема типового микроконтроллера

Деление микроконтроллера на отдельные элементы проводим по функциональным (выполняемые функции) и конструктивным признакам. Конструктивные признаки определяют, входят ли те или иные элементы в конструктив микроконтроллера (чип, плату или иную сборочную единицу – модуль) или нет. С этой точки зрения многие элементы человеко-машинного интерфейса (контроллер дисплея, контроллер клавиатуры, последовательный канал) обычно расположены на вычислительном ядре, поэтому выделение их в отдельный модуль весьма условно. Компоновка элементов в отдельные модули с конструктивной точки зрения во многом определяется серийностью выпуска. Чем более интегрирована конструкция микроконтроллера, тем ниже его себестоимость при серийном выпуске. Однако чем более интегрирована его конструкция, тем уже возможности его применения.

Устройство связи с объектом представляет вычислительному ядру услуги при обмене элементарными сигналами аналогового АК и дискретного ДК контроля с датчиками, характеризующими состояние объекта управления и сигналами дискретного ДУ и аналогового АУ управления с преобразователями энергетических потоков. В качестве периферийных компонентов САУ, непосредственно связанных с объектом управления, здесь используются, например электромагнитные реле, включающие и выключающие различные устройства (электромагнитные клапаны, двигатели и т. п.); твердотельные реле и транзисторные ключи.

Адаптер сети необходим для подключения микроконтроллера к сети. Каждый микроконтроллер выполняет возложенные на него функции управления. Если он поддерживает температуру в печи, то по сети от микроконтроллера высшего уровня он получает уставку, определяющую, какую температуру поддерживать, отвечает на запросы микроконтроллера, ответственного за проведение всего технологического процесса, о состоянии печи (температура печи, ее градиент и т. п.). В той же сети находятся микроконтроллеры, ответственные за проведение других процессов, например контроллер вакуумной системы, который должен напустить технологический газ, когда температура достигнет заданной. Этот приказ он может получить от микроконтроллера (МК) высшего уровня или от рассматриваемого регулятора печи. Часто адаптер сети бывает конструктивно встроен в вычислительное ядро. Причем на вычислительном ядре бывает несколько *последовательных каналов* и сетевых адаптеров.

По последовательному каналу МК может получать информацию от «интеллектуальных» датчиков, оснащенных собственными микроконтроллерами. Здесь информация будет поступать не в виде, например, токового сигнала 4...20 мА, с началом шкалы в 20 °С и верхним пределом в 100 °С, а в виде цифрового последовательного кода. По командам «интеллектуальный» датчик может проводить самотестирование, переключать шкалу измерения и т. п. К одному каналу может быть подключено несколько таких датчиков и устройств управления мощностью. Можно организовать этот сегмент сети так, что подчиненные устройства смогут обмениваться информацией, минуя рассматриваемый контроллер.

Периферийные компоненты САУ служат для управления энергетическими потоками, поступающими на исполнительные механизмы и иные детали машины, нуждающиеся в энергопитании. Обмен с ними происходит, как правило, элементарными сигналами дискретного и аналогового управления (ДУ и АУ). Управляют энергетическими потоками *ключи* – устройства, способные управляющий информационный сигнал преобразовать в энергетический поток с требуемыми параметрами.

Датчики, входящие в состав периферийных компонентов машины, выдают на линии связи сигналы, характеризующие состояние объекта управления. Это, как правило, элементарные сигналы аналогового (АК) и дискретного контроля (ДК).

Для построения САУ широкого класса оборудования достаточно иметь три типа МК в соответствии с тремя уровнями иерархии.

МК верхнего уровня – центральные МК. Это контроллеры для управления отдельными машинами, производственными участками, цехами, имеющие развитые сервисные возможности (вычислительные, графические, накопления информации, встраивания в локальные вычислительные сети и др.). Конструктивно такой контроллер строится как многоплатная конструкция и содержит вычислительное ядро и блок связи с объектом, ведущий информационный обмен с отдельными элементами машины. Этот контроллер стоит во главе сети САУ, координирует работу всей системы, выдает задания на исполнение локальным и узловым МК.

МК среднего уровня – узловые МК. Такие МК управляют достаточно развитой подсистемой машины, командуют фрагментом управляющей сети или отдельными сложными механизмами,

когда разместить на одной плате устройство, совмещающее функции управления и энергообеспечения, не удастся. Конструктивно узловой контроллер выполняется как многоплатный и содержит плату обработки информации (ВЯ) и платы связи с объектом, преобразующие информационные потоки между контроллером и объектом управления в удобный для обмена и управления вид. От центрального такой контроллер отличается меньшими вычислительными и сервисными возможностями (как правило, отсутствие дисплея и клавиатуры, меньший объем памяти и быстродействие и, как следствие, меньшая стоимость).

МК низшего уровня – локальные МК. Это контроллеры, располагаемые на периферии сети САУ и встраиваемые в управляемое устройство; как правило, это одноплатная конструкция, совмещающая функции преобразования энергии и информации.

Деление МК на три типа несколько условно, в реальном оборудовании наличие МК всех трех уровней не обязательно и одни могут успешно заменять другие. Узловые и центральные МК благодаря модульной гибкой конфигурации достаточно универсальны и могут управлять широким классом технологического оборудования, поэтому выпускаются серийно; локальные контроллеры, как правило, узкоспециализированные и разрабатываются под конкретный механизм.

В настоящее время рынок заполнен различными микропроцессорными средствами управления. В соответствии с особенностями построения, использования и программирования их подразделяют на несколько групп.

Локальные регуляторы (ЛР) (рис. 1.16, а) управляют каким-либо исполнительным механизмом широкого применения, например нагревателем, электродвигателем (асинхронным, постоянного тока и шаговым). Часто локальный регулятор совмещает функции электропитания и управления. Программирование сводится к заданию констант и закона регулирования. Большинство современных локальных регуляторов имеют возможность автоматического определения констант закона регулирования, память и последовательный канал связи, по которому могут получать и хранить параметры различных процессов технологии, таких как подъем температуры в печи с заданной скоростью до установленного предела с дальнейшей выдержкой температуры в течение заданного времени; охлаждение с заданным градиентом до заданной температуры и др.

Локальный регулятор может помимо формирования управляющего воздействия на энергетический поток обмениваться с объектом управления другими командами дискретного контроля и управления, сообщать о состоянии объекта управления. Он имеет средства местного и дистанционного программирования. Такой регулятор может полностью взять на себя функции локального контроллера и по возможностям адаптации и универсальности приближается к программируемым логическим контроллерам.



Рис. 1.16. Универсальные контроллеры для технологического оборудования:

а – локальный регулятор; *б* – программируемый логический контроллер

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) (рис. 1.16, *б*) конструктивно состоят из отдельных модулей в собственных корпусах, объединенных между собой системной шиной. Модули исполняют функции вычислительного ядра, устройств связи с объектом и коммуникационных устройств. ПЛК могут гибко комплектоваться под объект управления, естественно с некоторыми ограничениями по количеству модулей. Для программирования ПЛК разработаны специальные языки программирования (см. разд. 1.5), закрепленные в международном стандарте МЭК 61131-3. Эти языки предоставляют программисту достаточно широкие возможности для разработки управляющих программ.

ПЛК по уровню сложности подразделяют на три группы или уровня. Особенно активно программу выпуска всех трех уровней поддерживает фирма Siemens. Простейшие ПЛК (Siemens LOGO) призваны заменить системы на жесткой логике и выполняют функции локальных МК, хотя могут и полностью управлять простыми технологическими объектами.

ПЛК среднего уровня (Siemens SIMATIC) обслуживают уже сотни линий АК и ДК и управления, могут поддерживать более сложное программное обеспечение и выполнять функции центральных и узловых МК.

ПЛК высокого уровня сложности (Siemens PC) имеют развитый человеко-машинный интерфейс и выполняют функции центральных контроллеров.

Промышленные компьютеры еще более гибко комплектуются под объект управления. Их главное отличие от ПЛК высокого уровня сложности заключается в том, что они могут работать под управлением универсальных операционных систем и выполнять широкий круг задач общего применения, работать с базами данных, использовать ACAD, Word, Excel и т. п. Главным отличием промышленного компьютера от обычного офисного компьютера является отсутствие материнской платы. Она выполнена в том же конструктиве, что и платы УСО и подключается к какой-либо системной шине наряду с другими платами. Однако программно и аппаратно компьютер совместим с офисными компьютерами семейства PC, что позволяет вставить плату УСО в офисный компьютер и работать с ней.

На рис. 1.17 представлен промышленный компьютер в конструктиве «рабочая станция», т. е. все средства ввода-вывода, обработки и визуализации информации объединены в одном корпусе.



Рис. 1.17. Рабочая станция САУ для монтажа в 19-дюймовую стойку

Достаточно трудно провести четкую грань между ПЛК высокого уровня сложности и промышленным компьютером. Главным отличием ПЛК является заложенная в базовое программное обеспечение способность работать в жестком реальном времени, в то время как для работы промышленного компьютера в жестком реальном времени следует применять специальное программное обеспечение.

Следует выделить так называемые *встраиваемые промышленные компьютеры*, отличающиеся от упомянутых выше типовых компактностью, повышенной надежностью, жесткими требованиями к условиям эксплуатации. Типовая плата ВЯ в формате MicroPC приведена на рис. 1.18. На этой плате интегрировано практически все необходимое для полноценной работы: твердотельные флеш-диски; видеоконтроллер; порты клавиатуры, Ethernet, жестких дисков, последовательных каналов и т. д.

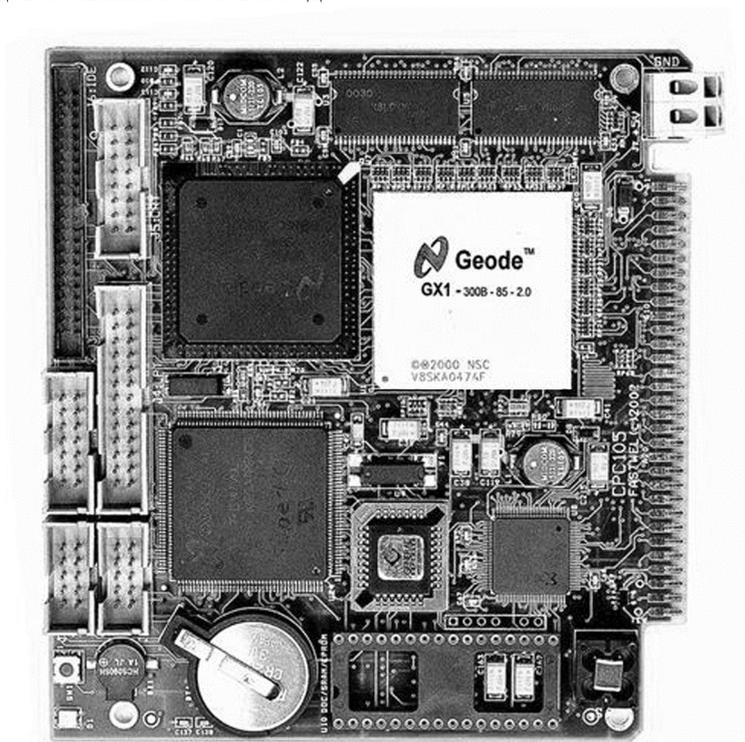


Рис. 1.18. Встраиваемый одноплатный промышленный компьютер

Средства распределенного сбора данных и управления ориентированы на применение в САУ, занимающих большие площади. Они состоят из согласованных между собой блоков ввода-вывода, устройств аналоговой обработки информации и нормализации сигналов датчиков, ПЛК, способных выполнять функции локальных и узловых контроллеров. Все эти средства включены в единую сеть с едиными средствами программирования.

Сеть, положенная в основу САУ, может иметь различные виды организации и архитектуры. По способу объединения абонентов сети бывают радиальными, радиально-кустовыми, кольцевыми и магистральными. В радиальных сетях по линии связи могут общаться только два абонента (рис. 1.19, *а*). Абоненты могут общаться либо поочередно, посылая сообщения и затем получая ответы (полудуплексный режим), либо одновременно посылая сообщения в обоих направлениях (дуплексный режим). Отдельный цикл обмена (запрос-ответ, транзакция) может инициироваться либо одним из абонентов (централизованное управление «ведущий – ведомый», master – slave), либо каждым из абонентов (децентрализованное управление доступом).

В радиально-кустовых сетях (рис. 1.19, *б*) в отличие от радиальных сообщение между абонентами организуется через ряд узлов, благодаря чему появляется возможность адресации и связи различных абонентов сети. В таких сетях также возможен дуплексный режим связи и централизованное либо децентрализованное управление.

В кольцевых сетях (рис. 1.19, *в*) все абоненты замкнуты в кольцо. Сообщение поочередно от одного абонента к другому проходит по сети. Здесь также возможен дуплексный режим связи и централизованное либо децентрализованное управление.

В магистральных сетях все абоненты подсоединены к одной линии связи (рис. 1.19, *г*). Здесь, как правило, дуплексный режим невозможен, но управление также может быть централизованным (master – slave) либо децентрализованным (сети с произвольным доступом).

Каждый из способов организации сети обладает преимуществами и недостатками. Наличие множества способов говорит об отсутствии наилучшего из них для различных условий применения. Радиальные сети наиболее просты. Практически каждый МК обладает хотя бы

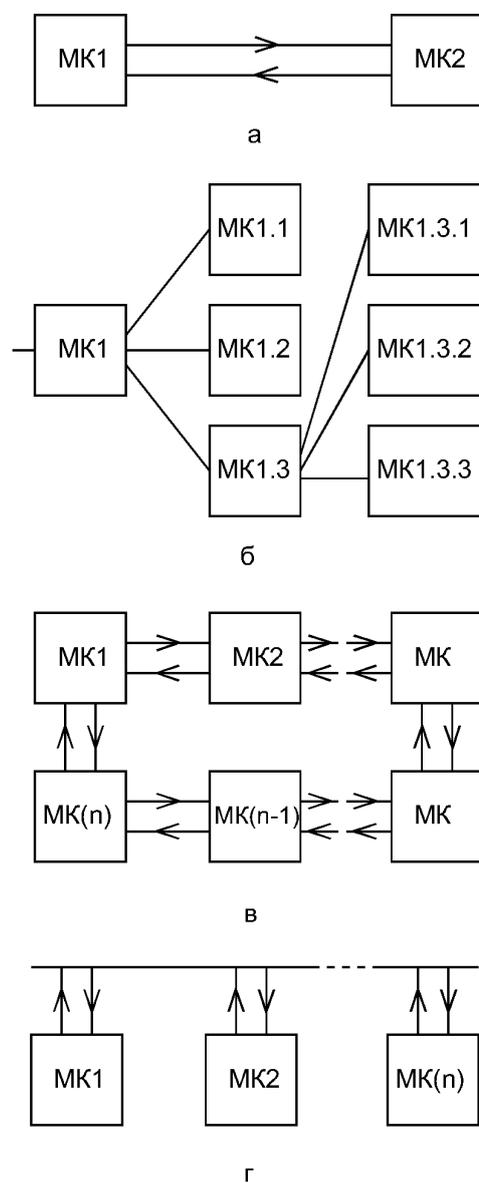


Рис. 1.19. Структурные схемы информационно-управляющих сетей САУ:
а – радиальной сети; *б* – радиально-кустовой; *в* – кольцевой;
г – магистральной

одним портом последовательного канала. Но такие сети не дают возможности выбора абонентов. Радиально-кустовые сети дают такую возможность, но требуют наличия в МК нескольких портов последовательных каналов. Кольцевые сети часто применяют в системах, объединяющих большое количество одинаковых устройств, но выход из строя одного из контроллеров, если не приняты специальные меры, ведет к разрыву сети. Магистральные сети гибки с точки зрения выбора абонента, способны «на лету» проводить подключение и отключение абонентов, но протоколы (правила обмена, см. разд. 1.5) работы таких сетей сложнее. Реальные управляющие сети строятся, как комбинация описанных здесь способов соединения и организации обмена.

На рис. 1.20 показана структура управляющей сети для установки диффузионной сварки в сверхвысоком вакууме. Технологический процесс включает в себя откачку камеры до сверхвысокого

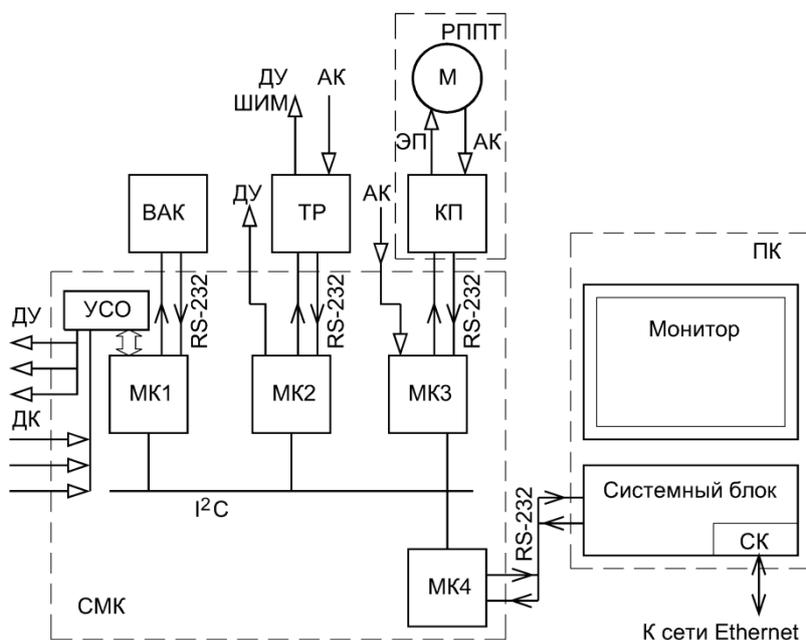


Рис. 1.20. Структура САУ для установки диффузионной сварки со специальным МК и промышленным компьютером

вакуума; ступенчатый нагрев образцов до требуемой температуры с учетом того, чтобы газовыделение из них не приводило к выходу давления за установленные пределы; сжатие свариваемых элементов со строго заданным во времени усилием; выдержку и ступенчатое охлаждение.

Это основные целевые функции технологии. Помимо основных на САУ возложены сервисные функции по отображению состояния процесса, сигнализации о выходе параметров за установленные допуски и отработке аварийных ситуаций, ведению трендов процесса (непрерывная запись параметров и их архивация). Функциями коррекции цели является перепрограммирование процесса в диалоговом режиме.

В системе управления можно выделить три основных модуля. На промышленный компьютер, являющийся в сети центральным, возложены сервисные функции по отображению состояния процесса, сигнализации о выходе параметров за установленные допуски, ведению трендов процесса и функции коррекции цели. Для этого он имеет монитор, клавиатуру и жесткие диски для хранения и архивации трендов.

При составлении управляющая программа формируется в виде текстового файла, содержащего информацию по ведению и взаимодействию основных процессов технологии. Оператор может составлять листинг заново в диалоговом режиме либо редактировать текстовый файл непосредственно в редакторе. Работает промышленный компьютер под управлением универсальной операционной системы, например Windows XP, и имеет сетевой адаптер и выход в сеть Ethernet для связи с системой управления высшего уровня, например с цеховой системой. По сети можно скачивать тренды процессов, подключаться к цеховой базе данных и получать задания на обработку очередных деталей и т. п.

С помощью канала RS-232, подключенного к одному из COM-портов промышленного компьютера, управляющая программа в упакованном виде передается в специальный МК (СМК), поддерживающий выполнение целевых функций САУ. По сути, это узловой контроллер. СМК содержит на печатной плате четыре микроконтроллера МК1–МК4, объединенных сетью I²C. Это магистральная сеть с распределенным управлением. Микроконтроллер МК4 выполнен на базе однокристалльного МК семейства MCS-51.

В его функции входит связь с промышленным компьютером и координация работы трех основных процессов технологии: откачки, нагрева и сжатия свариваемых образцов.

Однокристалльный микроконтроллер МК1 семейства PIC управляет работой вакуумной системы и ведет процесс высоковакуумной откачки. Сигналами дискретного управления он включает и выключает соответствующие вакуумные насосы и управляет электромагнитными клапанами. Линии дискретного контроля сигнализируют о состоянии клапанов и насосов. Выдаются эти сигналы на линии связи через смонтированное на той же плате устройство связи с объектом УСО. С помощью канала RS-232 МК1 связан с многофункциональным вакуумметром ВАК (см. рис. 1.20), позволяющим контролировать давление на различных участках вакуумной системы.

МК2 (серии PIC-18) управляет процессом нагрева. По линии ДК выдается сигнал на включение нагревателя. Управляет нагревателем локальный регулятор ТР. Он измеряет температуру объекта по линии АК, сравнивает сигнал с уставкой, хранящейся в его памяти, по рассогласованию уставки и фактической температуры вырабатывает управляющее воздействие и выдает его на блок питания нагревателя. Рассчитывается управляющий сигнал по пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) закону и выдается на блок питания нагревателя в виде широтно-модулированного сигнала. Мощность на нагревателе задается отношением времени включения к периоду широтно-модулированного сигнала (см. разд. 2.2).

Уставка на локальный регулятор ТР выдается по каналу RS-232 от МК2, в памяти которого хранится график процесса нагрева, для чего он разбивается на ряд линейных участков. В памяти микроконтроллера хранится температура окончания участка T_o , его длительность t_o и период обновления уставки h . Период обновления выбирается настолько большим, чтобы выдаваемая на регулятор уставка была каждый раз различной, и настолько малым, чтобы отклонение фактического графика температуры от директивного находилось в пределах, заданных требованиями к точности ведения процесса. Обычно эту величину, как и параметры ПИД-закона, заложенного в регулятор ТР, уточняют при отладке программного обеспечения.

МК3 (серии PIC-18) управляет процессом нагружения свариваемых деталей. Процесс реализуется регулируемым приводом по-

стоянного тока (РППТ), который представляет собой скомплектованный привод, включающий в себя электродвигатель М со встроенным безлюфтовым редуктором и контроллер КП. По последовательному каналу можно выставлять команды, по которым РППТ обеспечивает заданную частоту вращения с сохранением крутящего момента в требуемом диапазоне частот. Микроконтроллер МКЗ формирует такие команды исходя из заданного графика нагружения. По сути, работа РППТ не отличается от работы локального регулятора ТР. Получив от МКЗ требуемое усилие сжатия в виде уставки, контроллер КП по ПИД-закону регулирования формирует команды, должным образом модулирующие энергетические потоки, поступающие на двигатель. В качестве датчика обратной связи в этом локальном контуре регулирования используется датчик усилия, фиксирующий сжатие свариваемых образцов.

Это далеко не единственный вариант структурной реализации аппаратного обеспечения САУ, который во многом определяет и структурную организацию программного обеспечения. Здесь применен достаточно сложный оригинальный модуль СМК, включающий в себя три однокристалльных МК серии *PIC* и МК семейства *MCS-51*, объединенных локальной сетью I^2C . Разработка такого контроллера и особенно оригинального программного обеспечения к нему – достаточно трудоемкая задача, решение которой возможно при наличии опыта аналогичных разработок и средств программно-аппаратной эмуляции для отладки программного обеспечения.

Надежность САУ такой структуры целиком определяется надежностью работы СМК. Электронику часто в шутку называют наукой о плохих контактах и в этой шутке есть огромная доля правды. Объединение практически всего ядра САУ в одной плате, при ее грамотном исполнении, существенно повышает надежность системы. Для защиты от помех по питанию и программных сбоев МК здесь использованы супервизорные схемы и системы Watchdog, о которых речь пойдет далее в разд. 1.5.

Центральный контроллер на базе промышленного компьютера выполняет лишь сервисные функции и функции коррекции цели. Основную целевую функцию (выполнение заданного или директивного технологического процесса) ведут локальные микроконтроллеры. С помощью центрального контроллера в диалоговом режиме программируется процесс сварки и его параметры передаются локальным МК – это функции коррекции цели.

К сервисным функциям, обеспечивающим наилучшие условия для выполнения основных целевых, относятся отображение состояния установки на мониторе, периодический контроль за работой модуля СМК, прием сообщений о состоянии локальных процессов и фиксация трендов процессов нагрева и нагружения на жестком диске.

Программные сбои и зависания центрального контроллера при условии их своевременного обнаружения и перезагрузки задачи управления с учетом текущего состояния не критичны. Ведь каждый из локальных МК знает свои задачи.

Другой вариант структуры САУ для реализации тех же функций приведен на рис. 1.21. Здесь за основу взят встраиваемый

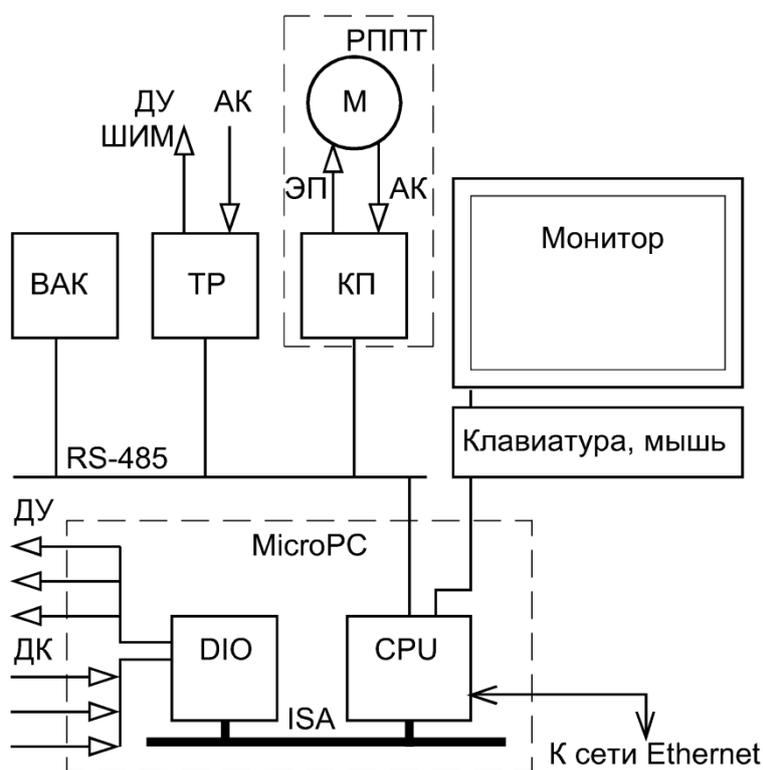


Рис. 1.21. Структура САУ для установки диффузионной сварки с промышленным одноплатным компьютером

компьютер в формате MicroPC (см. рис. 1.18). В системную магистраль ISA включено вычислительное ядро CPU, представляющее собой законченный компьютер с твердотельными дисками, видеоконтроллером, сетевым контроллером Ethernet, контроллером накопителя на жестких магнитных дисках и широкими возможностями расширения. Так поддерживается человеко-машинный интерфейс, сервисные функции и функции коррекции цели.

По шине ISA к вычислительному ядру подключена плата DIO, обеспечивающая выдачу необходимых сигналов дискретного контроля и управления. К порту канала RS-485 на CPU подключаем уже известные блоки ВАК, ТР и РППТ. Здесь программная поддержка процесса откачки полностью ложится на компьютер MicroPC, выполняющий помимо этого функции центрального контроллера. Процессы нагрева и нагружения обеспечивают, как и ранее, локальный терморегулятор и блок РППТ.

Возможностей CPU с большим запасом хватит, чтобы взять на себя функции терморегулятора и блока РППТ. Таким образом, все большее число функций аппаратной поддержки передают на программное обеспечение центрального контроллера, усложняя его и упрощая аппаратную часть. И здесь есть некоторая золотая середина. Программно эмулировать локальный терморегулятор несложно, но это не дорогостоящий блок и вполне можно все оставить, как показано на рис. 1.21. А вот регулируемый привод РППТ имеет относительно высокую стоимость, и если нет достаточного опыта разработки таких систем, то, очевидно, разработка технической документации, программного обеспечения, а также изготовление, отладка и доводка управляющей приводом программы дороже покупки готовой системы, не говоря о затратах времени.

Контрольные вопросы

1. Каковы состав и функции, выполняемые микроконтроллером – основной структурной единицы аппаратного обеспечения САУ?
2. Перечислите выполняемые функции и особенности построения центральных, узловых и локальных микроконтроллеров.
3. Назовите особенности построения и программирования локальных регуляторов, программируемых логических контроллеров, промышленных компьютеров и средств распределенного сбора данных и управления.

4. Сравните преимущества и недостатки типовых топологий управляющих сетей.

5. Приведите примеры вариативности построения управляющих сетей.

1.4. Последовательный процесс – основная структурная единица программного обеспечения САУ

Программное обеспечение САУ подразделяют на системное и пользовательское. При разработке конкретной программы всегда пользуются некоторым набором системных утилит общего применения. Это программы тестирования аппаратной части МК, программы для работы с плавающей точкой, программы-диспетчеры задач для поддержания их исполнения в реальном времени и др. При программировании пользуются этими системными утилитами и подпрограммами. На их основе и с их поддержкой создают управляющую программу – программу пользователя, описывающую правила выполнения системой предписанных функций. **Функция** определяет цель некоторых действий.

Для достижения поставленных целей реализуют ряд процессов, т. е. решают ряд задач. Так, в рассмотренном в разд. 1.3 примере полуфабрикаты параллельно откачиваются, нагреваются и нагружаются. Прежде всего введем и обсудим основные понятия и определения.

Событие – это момент фиксации чего-либо важного для технологии. Не слишком четкое определение, но говорящее о том, что это понятие субъективное. Главное здесь то, что событие моментально. Введем важное допущение: **два события не могут происходить одновременно**. Если приняли, что событие моментально и представляет собой точку на оси времени, то вполне оправдано, что эти точки всегда различны и события следуют друг за другом. События выступают как следствия каких-либо **действий**, либо как причина действий. Действия уже протяженны во времени и поэтому могут протекать параллельно.

События могут определяться непосредственно программой – **программные события** – и быть **внешними событиями** по отношению к управляющей программе. Примером программного события является появление новой информации после завершения выполнения очередной команды программного кода.

Для фиксации внешних событий в МК предусмотрен *механизм прерываний*. При этом МК оставляет основную программу и переходит в подпрограмму обслуживания прерывания. Существуют и другие способы фиксации внешних событий диспетчером процессов.

Все события можно разделить на *локальные*, имеющие значение только для данного потока, и *системные* (рис. 1. 22). Системные события каких-либо процессов (потоков) участвуют в инициализации действий в других процессах или потоках. Иначе говоря, событие данного потока, или какое-либо внешнее по отношению к управляющей программе событие (непосредственно не вычисляемое в ней), является системным, если оно обрабатывается ядром

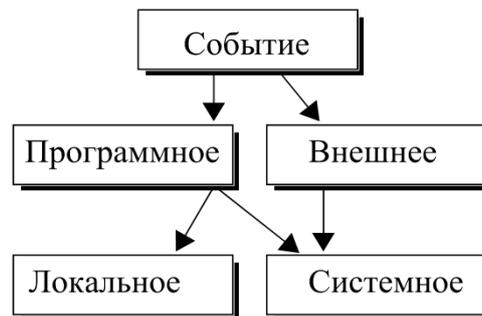


Рис. 1.22. Классификация событий при управлении технологической машиной

операционной системы (диспетчером процессов) и может участвовать в перераспределении вычислительных ресурсов между потоками. На рис. 1.22 показано, что внешнее событие не может быть локальным. Прерывание, предусмотренное для фиксации внешнего события, всегда запускает подпрограмму обслуживания этого прерывания, в результате чего перераспределяются вычислительные ресурсы МК. Если, конечно, прерывание не запрещено, но тогда и внешнего события для системы управления не будет.

Процесс – это совокупность событий и действий, объединенных общей природой и причинно-следственными связями и направленных на достижения поставленной цели. С принятой в стандарте POSIX (Portable Operation System Interface eXchange) точки зрения, процесс – это исполняемый программный код, расположенный в физически защищенном объеме памяти.

Последовательный процесс или поток (в англоязычной литературе – thread) – это последовательность связанных событий и действий. Каждое событие является следствием предыдущих действий и инициатором последующих. Рассмотренный в примере с роботом автоматный граф является типовым последовательным процессом или потоком. Событиями являются переходы из одного состояния в другое. Когда система задерживается в одном из состояний, осуществляются действия.

Часто смешивают понятия «процесс» и «поток», если проблемы распределения и защиты памяти не существенны. С точки зрения программиста, обмен и взаимодействие между потоками внутри процесса может осуществляться либо через глобальные переменные, либо при переходе к вложенной подпрограмме через стековый механизм обмена с использованием локальных переменных. Причем второй способ предпочтительнее и рекомендован к использованию для лучшей структуризации программ и автономности потоков и процедур, используемых в них.

Обмен между процессами (точнее потоками разных процессов) может осуществляться только через посылку сообщений. Это делает потоки максимально автономными. Каждый поток может осуществляться на различных МК, может быть автономно запущен и отлажен. Конечно, потоки влияют друг на друга. Так, в приведенном примере с установкой диффузионной сварки (см. разд. 1.3) процессы нагрева и откачки связаны тем, что нагрев инициирует газовыделение, ухудшает вакуум и не должен привести к выходу давления за установленные пределы. Но процесс нагрева может быть запущен автономно даже без откачки, если эмулировать сообщения о давлении при его запросах. Причем для процесса нагрева совершенно безразлично, какими средствами ведется откачка, важен лишь интерфейс процесса откачки, чтобы запросить и получить фактическое значение давления.

Обмен информацией путем передачи сообщений между потоками может быть реализован и в рамках одного процесса, что также стандартизует механизм обмена и повышает автономность программного кода потока.

Наибольшая автономность различных процессов и потоков позволяет распараллелить работы по программированию, повышает переносимость программного обеспечения, преемственность работ, использование программ сторонних производителей, облегчает отладку и сопровождение программного продукта.

Квантом будем называть отрезок потока между двумя системными событиями. Поток может содержать один или несколько квантов. В процессе выполнения кванта поток на другие потоки не влияет. Взаимодействия осуществляются только после завершения кванта. Организованный таким образом интерфейс взаимодействия потоков (процессов) способствует их автономности.

Рассмотрим и обсудим введенные понятия на примере потока или процесса регулирования температуры. Поток описан на некотором паскалеподобном языке и носит учебный характер. Поток управляет подъемом температуры в печи от исходной до максимальной T_{max} с градиентом температуры dT .

Циклически повторяющийся каждые 20 с квант регулирования температуры описан внутри оператора *while* $T < T_{max}$ *do*. В каждом проходе цикла встречается оператор *wait_t(20,4)*, передающий управление диспетчеру процессов с указанием включить этот квант в очередь на исполнение с задержкой в 20 с и приоритетом 4. Диспетчер процессов ведет очередь всех квантов и запускает их на исполнение, как только условия запуска будут выполнены.

```

thread NAGREV;
  Var T, Tmax, dT, Tf, Up, Tint, Tdif: real;    {T, Tmax Заданная, макси-
мальная и }
      {приращение температуры, Tf-фактическая температура,}
      {Up – управление, Tint, Tdif – постоянные времени.}
  Temp, Nagr : Channal;    {Аппаратные переменные, связанные }
      {с датчиком температуры и регулятором напряжения.}

  begin
  while T < Tmax do {Пока заданная температура меньше макси-
мальной}
  begin
  T := T + dT;          {рассчитать заданную температуру,}
  Tf := control(Temp); {измерить фактическую по каналу,}
  Up := PID(T, Tf, Tint, Tdif); {рассчитать управление по ПИД-}
  regulir(Up, nagr);    {закону и выдать значение Up по каналу nagr}
  wait_t(20,4)         {передать управление диспетчеру процессов}
  end;                 {с указанием (Ждать 20 секунд с приоритетом 4)}
  Start(STAB_T, 1)     {запуск процесса стабилизации температуры}
  Start(SQUEEZING, 0) {запустить процесс сжатия образцов}
  {через миллисекунду с приоритетом 0}
  Stop                 {Окончить процесс нагрева, когда температура достиг-
нута.}
  end.

```

Выполнение кванта этого потока (участка кода внутри оператора *while* $T < T_{max}$, ограниченного оператором *wait_t()*), займет менее миллисекунды и повторяется квант с периодичностью в 20 с. Остальное время ВЯ МК свободно и может обрабатывать кванты других потоков. Именно в результате быстрой обработки квантов различных потоков, даже на одном МК добиваются квазипараллельности выполнения управляющей программы.

Каждый поток (и квант) имеет **критерий начала**. По сути, это описание системного события, когда поток должен быть поставлен в очередь на исполнение. Критерий начала потока должен быть описан в других потоках или процессах или определяться внешними по отношению к управляющей программе событиями. В приведенном примере оператор *Start(STAB_T, 0, 0)* поставит в очередь поток стабилизации температуры *STAB_T* с приоритетом 0, а оператор *Start(SQUEEZING, 0)* – процесс сжатия свариваемых образцов. Приоритет говорит о том, что если время запуска различных квантов совпадет, диспетчер процессов выберет квант с максимальным приоритетом. Здесь квант с нулевым приоритетом считается самым «важным», хотя в других операционных системах или средах исполнения жесткого реального времени может быть и иначе. Например, в системе Neutrino, чем выше показатель приоритета, тем приоритетнее процесс. Если совпадут время запуска и приоритеты квантов, выполняется обычно квант, ранее поставленный в очередь. Существуют и другие алгоритмы и даже стратегии ведения очереди потоков или квантов.

Оператор *wait_t(20, 4)* передает управление диспетчеру процессов и ставит квант процесса *NAGREV* в очередь на исполнение через 20 с с приоритетом 4. Таким образом, завершение оператора *wait_t()* также является системным событием.

Критерий окончания указывает на то, что поток более не нужен и может не рассматриваться диспетчером процессов. Здесь это оператор *Stop*. После выполнения этой системной процедуры поток *NAGREV* будет исключен из очереди процессов. Его дескриптор, в котором хранится контекст, адрес первой команды кода и условия запуска процесса, будет уничтожен, чтобы не перегружать диспетчер процессов излишней работой. Далее процесс нагрева в технологическом цикле не нужен.

Помимо критериев начала и окончания каждый поток характеризуется **управляемыми, управляющими и контролируемыми переменными**.

Управляемая переменная характеризует качество ведения процесса. В приведенном примере диффузионной сварки управляемой переменной процесса или потока нагрева является температура изделия. Эта переменная в кванте управления процессом представлена значением T_f в формате реального числа.

Управляющей переменной, определяющей мощность, выделяющуюся на нагревателе печи, является значение U_p , рассчитанное в процедуре закона регулирования $PID(T, T_f, T_{int}, T_{dif})$ в зависимости от требуемой температуры T , или уставки, фактической температуры T_f и постоянных интегрирования T_{int} (задержки) и дифференцирования T_{dif} (опережения). Ранее в курсе «Управление в технических системах» говорилось, чем определены и как выбираются эти параметры [2, 3].

В рассматриваемом примере управляемую переменную, определяющую качество процесса, можно непосредственно контролировать, поэтому температура T_f является одновременно и **контролируемой переменной**. Ее значение формируется функцией $control(Temp)$, которая преобразует нормированный аналоговый сигнал с термопары, расположенной вблизи зоны сварки, в дискретный вид. При этом сигнал с термопары фильтруется (очищается от помех). Как это делается, рассмотрим далее, в гл. 2.

Кванты потоков, используемых в САУ, разделяют на **синхрокванты**, запускаемые или перезапускаемые по времени, как в рассмотренном ранее примере программы нагрева, и **кванты, запускаемые внешними событиями**, – **интеркванты**. Эти внешние по отношению к управляющей программе события происходят, например при нажатии на какую-либо кнопку управления на пульте, при срабатывании конечных выключателей и т. п. Из курса вакуумной техники известно, что есть так называемые блокировочные вакуумметры, которые выдают дискретный сигнал, если давление превзойдет некоторый заранее установленный уровень, или опустится ниже него. Причем, таких уровней может быть несколько. Это также будет внешним событием. О наступлении внешнего события системе управления обычно сообщает прерывание.

Диспетчер процессов или задач, являющийся неотъемлемой частью программного обеспечения современных САУ, следит за оче-

редностью исполнения квантов потоков. При возникновении внешнего системного события он через прерывание узнает об этом и ставит в очередь на исполнение связанный с этим событием интерквант.

Описанное деление программного обеспечения на процессы, потоки и кванты заложено во все современные средства разработки и поддержки исполнения управляющей программы, но имеет свои особенности в каждой конкретной системе. Это часто приводит к терминологическим проблемам. Так, в среде программирования CoDeSys, построенной в соответствии с международным стандартом МЭК 61131-3, рассмотренный квант определен как задача. Задача имеет название, приоритет и тип. Тип определяет условие вызова задачи на исполнение. Типом задачи *cyclic* она определяется как синхроквант, типом задачи *triggered by external event* – как интерквант.

В некоторых системах кванты, запускаемые внешними событиями, разделяют на *экстракванты*, запускаемые по возникновению прерывания, не ожидая завершения выполняемого кванта, и интеркванты, которые ставятся в очередь диспетчером процессов с установленным приоритетом и запускаются в порядке очереди. Рис. 1.23 иллюстрирует способы запуска синхро-, интер- и экстраквантов на исполнение.

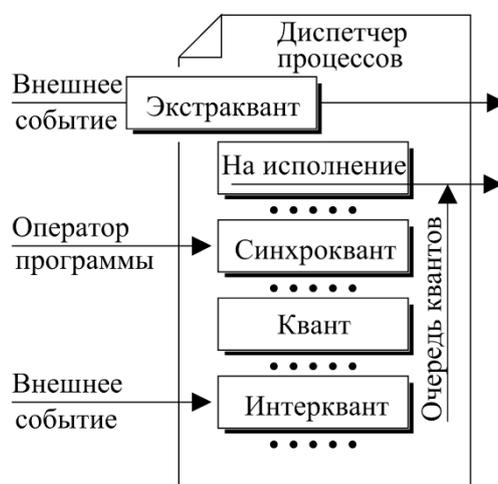


Рис. 1.23. Способы запуска квантов программного обеспечения САУ на исполнение

Широкое использование экстраквантов при разработке управляющих программ снижает предсказуемость их поведения и вероятность успешного и быстрого восстановления управляющей программы при программных сбоях. Повышается и трудоемкость отладки программного обеспечения.

Если разбивать код управляющей программы на достаточно короткие кванты (около миллисекунды), задержка реакции на запуск интеркванта будет также в этих пределах, что вполне достаточно для большинства ситуаций в технологическом оборудовании, поэтому экстракванты используют, как правило, в чрезвычайных аварийных ситуациях, например при обнаружении пропадания электропитания на МК. Далее при изучении супервизорных схем рассмотрим реакцию на такие ситуации.

Внутри квантов пользователя содержатся основные элементарные утилиты взаимодействия с объектом по выявлению его состояния:

ДК – дискретный контроль состояния элементов объекта;

АК – аналоговый контроль состояния элементов объекта

либо утилиты по изменению состояния объекта управления;

ДУ – дискретное управление элементами объекта (включить или выключить привод, клапан и т. п.);

АУ – аналоговое управление элементами объекта (подать управляющее напряжение заданной величины на регулятор нагревателя, на блок управления двигателем постоянного тока или управления асинхронным трехфазным двигателем и т. п.).

Через операции ДУ, ДК, АУ и АК и осуществляется взаимодействие системы управления и управляемого объекта. Они и являются интерфейсом между ними. Определимся, что же такое операции контроля и управления, события или действия? Начало либо конец операции – событие, сама операция – действие. Так, операция аналогового контроля, когда МК получает дискретный код контролируемого аналогового сигнала объекта, проводится с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Длится она заметное время, около 10 мкс, в течение которых происходят два события: начало преобразования – «старт АЦП» (оно инициирует процесс преобразования), а после его завершения – «конец преобразования». Результат будет считан в программе управления.

Операции ДК бывают с программной и аппаратной инициализацией. При программной инициализации контроль проводится по инициативе программного обеспечения. При аппаратной инициализации изменение состояния объекта контроля фиксируется через прерывания. Тогда событие, заключающееся в изменении его состояния, становится системным. Оно запускает интерквант, в теле которого описана реакция на это событие.

Для проведения операций ДК и ДУ микроконтроллер имеет в составе специальные регистры (рис. 1.24). Эти регистры входят обычно в состав плат УСО (см. рис. 1.15). Входы регистров дискретного контроля RG1 подсоединены к сигналам объекта ДК, а выходы Q программно доступны для операций чтения через шину МК. Уровнем сигнала на линии ДК1 определяется содержимое нулевого бита регистра контроля и т. д.

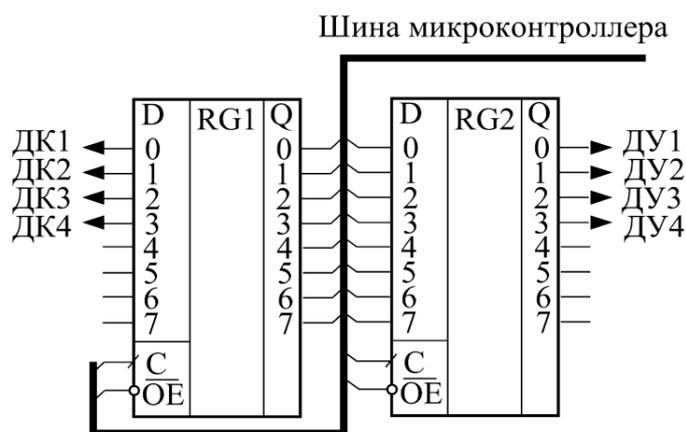


Рис. 1.24. Регистры ДК и ДУ микроконтроллера

Если необходимо реализовать ДК с аппаратной инициализацией, линии ДК подсоединяют к входам прерывания. Поскольку линий прерывания мало, обычно линии ДК с аппаратной инициализацией подают на входы логической ячейки И, а уже выход этой ячейки присоединяют к входу линии прерывания. Тогда, если хотя бы на одной линии ДК появится низкий уровень сигнала, возникнет прерывание. В подпрограмме обработки этого прерывания

можно будет определить, по какой из линий ДК оно инициализировано. Для этого необходимо проанализировать содержимое регистров ДК.

Входы регистров ДУ RG2 подсоединены к шине МК, а выходы формируют сигналы ДУ. Содержимым нулевого бита определяется уровень сигнала на линии ДУ1 и т. д. По сигналу синхронизации С информация со входа переписывается внутрь регистра, а по сигналу OE (Output Enable) передается из регистра на его выходы. Подробнее с работой и устройством регистров можно ознакомиться в разд. 2.4. Регистры имеют определенные адреса, из курса информатики известно, что даже в языках программирования высокого уровня есть возможность задавать аппаратные переменные, т. е. переменные, имеющие заданный адрес в пространстве памяти. Эти переменные и будут программно использоваться для обращения к элементам объекта управления.

Для проведения операций дискретного контроля в управляющей программе нужно уметь считывать содержимое отдельных битов, а в языках программирования высокого уровня, как правило, оперируют машинным словом, совокупностью битов. Следует отметить, что в ассемблере современных МК (микропроцессоров, ориентированных на задачи управления) есть команды манипулирования отдельными битами их выходных портов. Далее будут описаны устройства типовых МК семейства MCS-51. Если команд манипулирования с отдельными битами нет, используют приемы маскирования.

Если необходимо узнать, в нуле или единице сигнал ДК2 (см. рис. 1.24), проводят операцию логического И содержимого регистра RG1 с маской, значение которой в двоичном коде равно 0000010. Операция даст нулевой результат, если в первом бите RG1 содержится нуль. Иначе в рассматриваемом бите – единица.

Для того чтобы узнать, не поменялся ли хотя бы один бит регистра ДК, используют операцию «исключающее ИЛИ». Ее нулевой результат с прошлым значением указывает на то, что изменений не было. Иначе в изменившихся по сравнению с прошлым моментом контроля битах будут установлены единицы.

Для того чтобы установить какой-либо бит, не изменив содержимого остальных, используют ИЛИ регистра ДУ и маски.

Например, чтобы установить третий бит RG2 (см. рис. 1.24), необходимо переписать в регистр результат логического ИЛИ его прошлого содержимого с маской 00001000. Для того чтобы сбросить этот бит (записать в него нуль), следует переписать в регистр результат логического И прошлого содержимого этого регистра с маской 11110111.

Для проведения операций аналогового контроля и управления необходимы аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи. Будем изучать их в разд. 2.5.

В приведенном ранее примере кванта оператор «*Tf:= control (Temp); {измерить фактическую температуру по каналу,}*» задает операцию АК. Оператор «*regular(Ur, nagr); {выдать значение Ur по каналу nagr}*» задает операцию АУ. При этом МК может выдать аналоговый управляющий сигнал на некоторый регулятор мощности, который сформирует адекватный этому сигналу энергетический поток на привод.

Сформировать энергетический поток требуемой мощности можно и с помощью команд дискретного управления ДУ. Это делается с помощью фазо- или широтно-импульсного управления мощностью, которое рассмотрено в разд. 2.1.

Использование описанного процессного подхода к программированию систем управления позволяет существенно упростить программирование и отладку ПО, упрощается его переносимость с объекта на объект.

Графическая иллюстрация введенных здесь понятий об организации пользовательского ПО САУ приведена на рис. 1.25. Коротко связь введенных понятий об организации ПО можно сформулировать так.

Функция описывает не конкретные действия, а их цель, вне зависимости от способа реализации. Существует три класса функций управления технологическим оборудованием.

Основная целевая функция (или функции) определяет цели технологического процесса, например откачку, обезгаживание оболочки и арматуры, активировку катода кинескопа или диффузионную сварку заготовок. Для более точного определения функции требуются числовые параметры, например, допустимое напряжение через сварной шов или остаточное давление в кинескопе, сила тока электронного луча и т. п.

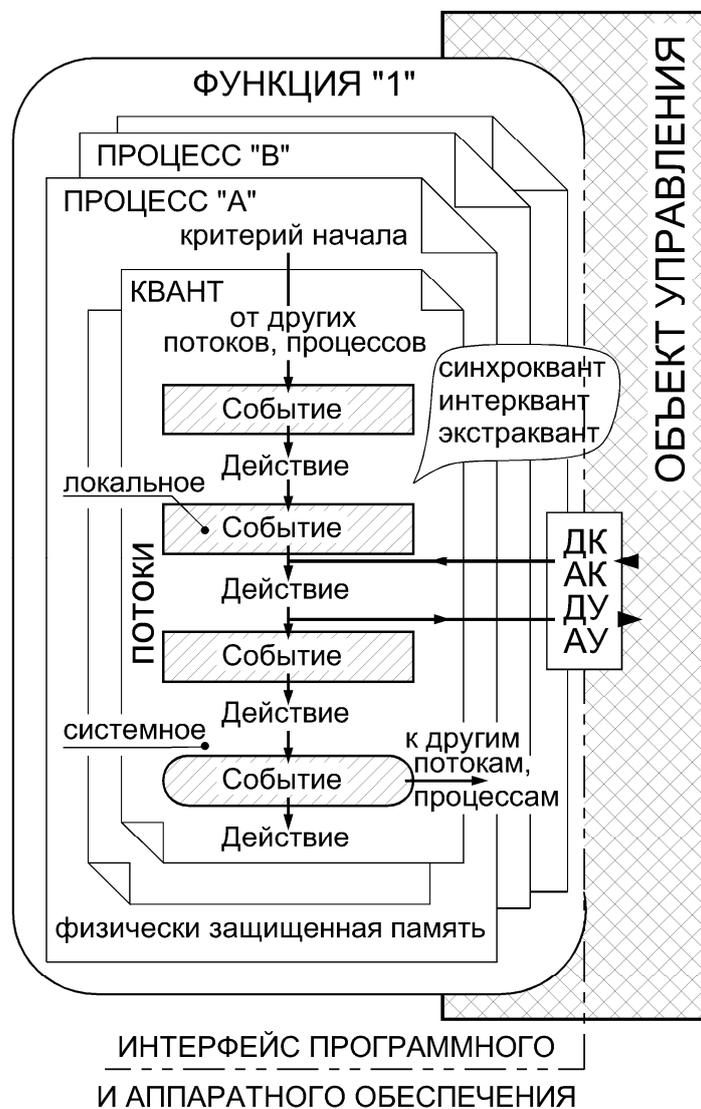


Рис. 1.25. Организация ПО САУ последовательными процессами

Функция «1» включает в себя и требует для своей реализации проведения ряда процессов «А», «В» и т. д. Каждый процесс состоит из ряда потоков, объединенных общей физической природой.

дой. Например, процессы откачки и обезгаживания тесно связаны, поскольку вместе формируют давление в оболочке кинескопа и имеют общие управляющие, управляемые и контролируемые переменные. С точки зрения программиста потоки объединяются в процесс общей памяти. Объединение ряда потоков в один процесс, с одной стороны, упрощает обмен информации между ними, поскольку они могут иметь доступ к общим глобальным переменным, а с другой, – усложняет процесс компиляции и отладки программного обеспечения, поскольку транслироваться потоки должны с одинаковыми объявлениями глобальных переменных. Кроме того, усложняется и переносимость программного обеспечения при переходе на другие контроллеры.

Потоки и входящие в них **кванты** состоят из последовательности событий и действий. Событие может быть **системным** или **локальным**.

Потоки состоят из отдельных квантов, которые по способу перезапуска делят на **синхрокванты**, перезапускаемые через заданные интервалы времени, и **интеркванты**, запускаемые внешними системными событиями. Кванты перезапускаются диспетчером задач, входящим в состав программного обеспечения, в порядке очереди в соответствии с предписанными условиями запуска. Особую группу могут составлять **экстракванты**, запускаемые диспетчером задач вне очереди.

Загрузка процессора существенно зависит от способа запуска квантов.

Контрольные вопросы

1. Приведите основные понятия и определения последовательного процесса и его элементов.
2. В чем состоят достоинства описания работы технологической машины совокупностью взаимодействующих потоков?

1.5. Структура программного обеспечения и основы программирования микроконтроллеров

Прежде чем приступить к обсуждению структуры программного обеспечения МК отметим, что оно всегда разбивается на управляющие коды и константы, которые должны быть неизменны при работе программы, и переменные данные.

Структура программного обеспечения может быть рассмотрена на *физическом* и *логическом уровнях* (рис. 1.26). В первом случае принимается во внимание, в какой зоне памяти расположены управляющие коды и переменные ПО, а во втором рассматривается их взаимосвязь, взаимодействие и иерархическая подчиненность.

Программное обеспечение САУ

- С жесткой структурой (резидентное)
- С гибкой структурой (загружаемое)

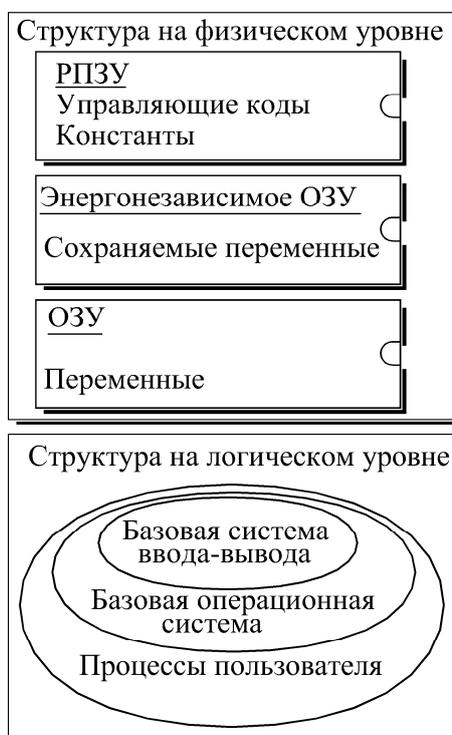


Рис. 1.26. Структура ПО САУ на физическом и логическом уровнях

Кроме того, структура на обоих уровнях может быть жесткой (резидентной), когда управляющие коды и константы размещены в репрограммируемой постоянной памяти, сохраняемые константы –

в энергонезависимом оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ), локальные переменные, утеря значений которых при сбоях не может вызывать принципиальных (не подлежащих восстановлению) ошибок – в «штатном» ОЗУ. Энергонезависимое ОЗУ не теряет содержания при пропадании электропитания, штатное ОЗУ – это область памяти, не защищенная от обесточивания.

При *гибкой* (перезагружаемой) структуре ПО при инициализации системы загружается в оперативную память и структурируется в ней должным образом. Здесь еще можно отследить, чтобы коды, константы и сохраняемые переменные были при загрузке размещены в энергонезависимом ОЗУ, но оперативно размещать управляющие коды в РПЗУ уже не удастся.

Системы с резидентной структурой памяти быстро (за миллисекунды) восстанавливаются после сбоев, поскольку не требуется перезагружать память или объем перегрузки минимален. Процессы пользователя благодаря этому прекрасно поддерживаются в жестком реальном времени. Однако САУ с такой структурой теряют в гибкости программирования, не допускают перепрограммирования на ходу и сложнее в отладке. Как правило, так организована память ПЛК. Чтобы резидентно организовать память промышленного компьютера, нужно принимать специальные меры. Далеко не каждая процессорная плата и не каждая система разработки программного обеспечения сможет это реализовать.

Программное обеспечение развитых систем автоматического *управления на логическом уровне* должно быть хорошо структурированным и строиться как ряд взаимоохватывающих оболочек (см. рис. 1.26). Это облегчает написание и отладку отдельных элементов управляющей программы, обеспечивает переносимость программ и позволяет вести работы по созданию ПО параллельно, что в итоге сокращает сроки разработки и повышает качество работ. Каждая внутренняя оболочка оказывает услуги внешней, причем связаны только два уровня и переход через уровень недопустим. Идеология такого иерархического разбиения взаимодействия будет рассмотрена во второй части пособия.

Ядрам ПО являются машинные коды, организующие элементарные операции взаимодействия с объектом. На этом, первом, уровне реализуются операции дискретного и аналогового контроля

(ДК и АК) и управления (ДУ и АУ). Это контроль, установка и сброс отдельных битов, непосредственно связанных с объектом управления; проведение аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования и ряд других неизменных утилит, которые, как правило, зашиваются в ПЗУ или РПЗУ. Аналогом такого ядра является система BIOS персональных компьютеров клона PC.

На *втором подуровне* расположен слой базовой операционной системы (БОС). Такой слой бывает явно выражен и развит в универсальных и специализированных контроллерах. В качестве примера можно привести свободно программируемые контроллеры ПЛК фирмы Siemens или семейство SPS Festo фирмы Festo и др. В промышленных компьютерах на этом уровне часто работает какая-либо широко распространенная универсальная операционная система. Реально операционная система сама распадается на ряд уровней, но не будем проводить здесь такую детализацию. На этом подуровне осуществляются следующие функции.

1. Поддержка выполнения программ пользователя. БОС в современных контроллерах реализует процессный подход к программированию и поддерживает многозадачность при выполнении программ пользователя. Многозадачность реализуется за счет согласованного параллельного или квазипараллельного (при наличии единственного микропроцессора в контроллере) выполнения управляющих программ. Управляющая программа состоит из отдельных процессов и потоков, объединенных общей физико-химической природой и, следовательно, едиными переменными. Поток разделяется на отдельные кванты – непрерывно выполняющиеся части программы.

Различают *исключающую многозадачность*, когда отдельные кванты процесса формируются принудительно диспетчером системы, и кооперативную, или *добровольную многозадачность*, когда кванты сами передают управление диспетчеру, а он анализирует очередь квантов и запускает тот из них, условия запуска которого выполнены. В сложных системах управления, когда обрабатываются большие массивы информации, применяют, как правило, какие-либо операционные системы реального времени общего назначения (QNX Neutrino, LINUX, модификации Windows) либо специализированные операционные системы и среды реального времени, в которых используется исключаящая

многозадачность. Такие системы и среды более терпимо реагируют на ошибки, весьма вероятные в сложных управляющих программах, и защищают отдельные задачи от взаимного несанкционированного изменения данных.

Если базовая операционная система является однозадачной, например, пока еще широко используемая в промышленных компьютерах *Flesh-DOS 6.22*, создается дополнительный уровень ядра реального времени *RTKernel*.

Кроме поддержки многозадачности слой БОС содержит и подключает библиотеку стандартных процедур и функций (БСП), которая включает в себя унифицированные, наиболее употребляемые подпрограммы, например утилиты ПИД-регулирования и т. п.

2. Сетевые функции. Для работы в сети БОС содержит протоколы обмена, реализующие поддержку процессов обмена сообщениями между процессами и МК управляющей сети САУ. Более детально эти функции будут рассмотрены в следующем разделе.

3. Защита от программных и аппаратных сбоев. Если напряжение на линии электропитания контроллера падает ниже некоторого предела, генерируется системное прерывание, по которому содержимое памяти МК копируется в специальную зону энергонезависимого ОЗУ. При дальнейшем падении генерируется системный сброс, и при повторном включении электропитания система способна восстановить свое состояние и продолжить выполнение управляющей программы, если это необходимо. Для защиты от программных сбоев, как правило, предусматривают систему *WD (Watch Dog)*. При правильной работе система периодически генерирует сигнал *WDI*, фронтом или спадом которого сбрасывается *WD*-таймер супервизорной схемы, защищающей МК от программных и аппаратных сбоев. Если система потеряет управление и сигналов *WDI* не будет, генерируется сброс МК и программа возвращается в БОС.

4. Поэтапная отладка программного обеспечения. БОС поддерживает ввод программ в ОЗУ, их пошаговое исполнение, вывод содержимого регистров и трассировку переменных на каждом шаге, ввод точек останова.

На *третьем подуровне* расположен слой программ пользователя (ПП), который содержит набор программ для реализации ос-

новых целевых функций САУ, функций коррекции цели и сервисных функций. Основные целевые функции поддерживают управление технологическим процессом, функции коррекции цели – процессом перепрограммирования цикла. Сервисные функции обеспечивают условия для оптимального протекания технологии, поддерживают надлежащую безотказность, ремонтпригодность и долговечность технологической машины.

На рис. 1.26 не показан *четвертый подуровень*, который содержит параметры настройки программ пользователя, обеспечивающие реализацию конкретных технологических режимов обработки. Этот слой создается при реализации функций коррекции цели и существует, когда такие функции предусмотрены.

Здесь рассмотрена некоторая обобщенная структура программного обеспечения систем автоматического управления. Методы и средства программирования различных контроллеров, безусловно, различны. Центральные контроллеры должны иметь развитый и сложный человеко-машинный интерфейс (Man Machine Interface, MMI) и часто предназначены для выполнения супервизорных функций (SCADA, Supervisory Control And Data Acquisition) в АСУ ТП. Таким контроллерам допустимо работать в так называемом мягком реальном времени, структура их программного обеспечения является гибкой, они непосредственно не определяют параметры конкретной технологии, а лишь переопределяют уставки (заданные параметры) процессов для локальных контроллеров. Для программирования и поддержки выполнения управляющих программ таких контроллеров применяют специализированные объектно-ориентированные языки и среды (Genesis, Genie, QNX-Momentics и др.) и универсальные (Windows) либо специализированные (QNX Neutrino, Linux, VxWorks и др.) операционные системы (ОС). Достаточно подробный обзор таких систем приведен в работе [3].

Если центральный контроллер берет хотя бы часть целевых функций на себя, недопустимо ждать, когда ОС загрузится в течение минуты (и даже десяти секунд). И дело здесь не в первоначальном включении, а в том, что программные сбои из-за множества причин всегда возможны. Ошибки оператора, сбои в электропитании, помехи – от них можно защититься, но следует быть готовым к их проявлениям. Есть надежные средства обнаружения и устранения программных сбоев, но они связаны с перезагрузкой

программного обеспечения. В этом случае предпочтительнее выбирать специализированные ОС, разработанные на основе микроядра (QNX Neutrino), которые позволяют при трансляции создавать компактные программы, способные к автономной работе без поддержки полномасштабной ОС, либо полностью резидентные системы с заданной физической структурой программного обеспечения.

Международный стандарт МЭК 61131-3 определяет языки разработки программного обеспечения ПЛК, на основе которых созданы инструментальные среды для их программирования, как специальные, предназначенные для конкретных типов, так и универсальные. Так, фирма Siemens на основе этого стандарта поставляет специальные средства разработки ПО для своих контроллеров Siemens LOGO, Siemens SIMATIC и Siemens PC. Фирма 3S (Smart Software Solutions) поставляет универсальную среду CoDeSys, включающую в себя редакторы для ввода программ на определенных стандартом шести языках программирования, компиляторы, генерирующие исполняемый машинный код, и широкий набор средств отладки и сопровождения. Все эти языки делятся на *символьные* и *графические*. Символьные языки ориентированы как на профессиональных программистов, так и на специалистов в предметных областях, знакомых с общими основами программирования.

Язык IL (список инструкций) – низкоуровневый язык, применяемый для реализации особо критичных по времени модулей проекта. Характеризуется высоким временем разработки и требует углубленного знания структуры контроллера; широко используется при оптимизации. Этот язык имеет сходство с типовым ассемблером и каждый его исполняемый оператор транслируется в машинный код используемого микропроцессора или микроконтроллера.

Язык ST, STL (структурированный текст, язык структурированного текста). В системе программирования Siemens применяется аббревиатура немецкого языка SCL. В связи с применением аббревиатур иногда возможна путаница. Так, язык IL на немецком языке обозначают также STL, поэтому далее будем придерживаться английских аббревиатур и всегда приводить имя языка на русском языке. Структурированный текст – высокоуровневый паскалеподобный язык, наиболее широко применяющийся в

настоящее время для разработки проектов ПО ПЛК, поскольку сокращает время разработки, удобен для реализации как алгоритмов, так и сложных математических вычислений. Приведенный в начале раздела пример кванта вполне подходит для иллюстрации этого языка.

Графические языки ориентированы на специалистов в предметных областях и позволяют им применить профессиональные знания и умения для программирования ПЛК.

Язык LD (контактно-релейные схемы) предназначен для разработчиков МП САУ, имеющих большой опыт разработки контактно-релейных систем. Программа на этом языке изображается в виде электрической схемы, состоящей из набора цепей нормально разомкнутых и нормально замкнутых контактов, кнопок и катушек реле. Эти цепи подают электропитание на исполнительные механизмы. Все цепи в процессе работы программы поочередно моделируются и, если состояния элементов схемы и внешние условия позволяют исполнительному механизму срабатывать, он включается. Таким образом реализуется типовое отношение условие – действие, положенное в основу управляющей программы. Вся управляющая программа разбивается на ряд шагов, описывающих отношение условие – действие. После окончания очередного действия система переходит к следующему шагу и т. д. до завершения цикла. По сути, программа внешне похожа на контактно-релейную схему и при компиляции создает программный код, моделирующий работу изображенной схемы.

Язык FBD (функциональные блок-диаграммы) ориентирован на специалистов, имеющих опыт разработки принципиальных электрических схем с использованием логических ячеек, триггеров, таймеров и других электронных компонентов, являвшихся основой дискретной электроники в 60–70-е годы прошлого века. Тогда на таких элементах часто разрабатывали всю систему управления. Сейчас такие компоненты в виде интегральных схем (ИС) малой и средней степени интеграции также выпускаются, но используются в основном для периферийных цепей САУ. Программа на этом языке напоминает принципиальную электрическую схему на ИС.

На **языке SFS** (последовательные функциональные схемы) программа выглядит как автоматный граф и включает в себя события (условия перехода) и действия (состояния). Все условия пере-

хода размечаются, в каждом из состояний задается список управляющих воздействий и программа готова. Проблема лишь в том, что описать совокупность параллельно протекающих процессов таким образом в одной программе достаточно сложно, а подчас и невозможно, хотя это чаще всего и не нужно.

Язык CFS (непрерывные функциональные диаграммы) ориентирован на специалистов в области автоматики и систем автоматического регулирования. В нем программа изображается, как ряд структурных схем систем автоматического регулирования. Имеется возможность задавать обратные связи, элементы сравнения, законы регулирования.

Языки контактно-релейных схем LD и функциональных блок-вых диаграмм FBD часто бывают встроены в ПЛК малой и средней сложности, реализуя все возможности его ВЯ. Больших возможностей языка программирования для таких контроллеров не требуется. ПЛК не нуждается в инструментальных средствах отладки, являясь законченным автономным изделием.

В развитых системах проектирования программного обеспечения эти языки могут смешиваться и дополнять возможности друг друга.

Контрольные вопросы

1. Опишите структуру программного обеспечения САУ на физическом и логическом уровнях.
2. Каковы способы защиты программного обеспечения от сбоев в процессе работы?
3. Сравните языки программирования ПЛК.

ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ САУ

Только знание работы основных электронных компонентов позволит усвоить правила построения систем управления и энергообеспечения, понять, из каких предпосылок они строятся, постичь гармонию аппаратного и программного обеспечения САУ. Изучение начнем с полупроводникового диода и закончим микроконтроллерами. При этом физику работы компонентов САУ будем изучать лишь на том уровне, который поможет понять формирование его основных свойств. Более подробные сведения о работе и применении различных электронных компонентов САУ приведены в работе [4].

2.1. Дискретные электронные компоненты САУ

Основными электронными компонентами современных САУ являются интегральные схемы малой, большой и сверхбольшой степени интеграции (ИС, БИС, СБИС). Дискретные электронные компоненты применяют в основном на периферии, в линиях связи с объектом управления, в устройствах формирования требуемых энергетических потоков (электронных ключах) и как вспомогательные элементы для подключения различных интегральных схем.

Полупроводниковый диод. Основу полупроводникового диода составляет $p-n$ -переход, пропускающий ток в одном направлении и не пропускающий в другом. Диод – это двухвыводной прибор, вольт-амперная характеристика которого и обозначение на принципиальных электрических схемах представлены на рис. 2.1.

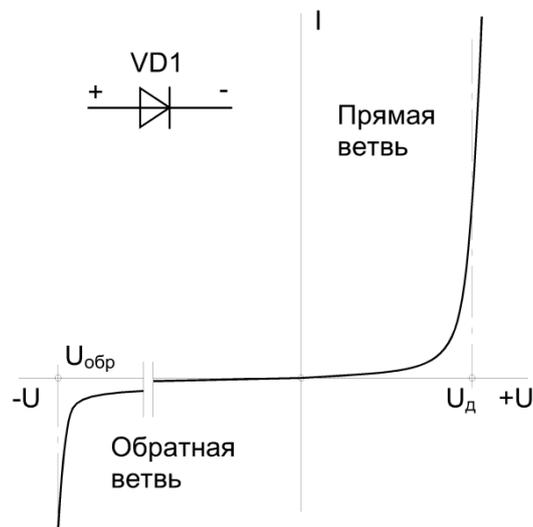


Рис. 2.1. Вольт-амперная характеристика диода

Имеется две ветви вольт-амперной характеристики: прямая, когда положительное напряжение подано на вывод, помеченный знаком «+» (на *p*-вывод *p-n*-перехода или анод) и обратная.

На прямом участке зависимость представляет собой экспоненту, и сила тока, начиная с некоторого значения U_d , резко возрастает. Напряжение U_d называют прямым падением или «пяточкой» диода. Для кремниевых диодов оно составляет около 0,6...0,7 В, существенно зависит от температуры перехода и падает примерно на 0,2 В при повышении температуры на 100 °С.

Стандартными характеристиками выпрямительных диодов, применяемых в САУ, являются номинальное и предельное значения силы прямого тока диода $I_{пр}$, иногда в зависимости от температуры корпуса. Важным также является и предельное значение обратного напряжения $U_{обр}$.

В основе диодов Шоттки – переход металл–полупроводник. Прямое падение напряжения на них ниже, чем в кремниевых *p-n*-переходах, и составляет 0,25...0,40 В. Однако диоды Шоттки отличаются от типовых кремниевых диодов меньшими предельными значениями обратного напряжения.

Очень широко диоды применяют как элементы САУ. Прежде всего диод – это выпрямитель переменного тока. На рис. 2.2 приведе-

ны наиболее типичные примеры применения диодов для защиты от индуктивности нагрузки при ее включении и выключении (см. рис. 2.2, *a*), защиты линий связи вычислительного ядра САУ с элементами контроля и управления (см. рис. 2.2, *б*), а также для автоматического подключения резервного питания (см. рис. 2.2, *в*).

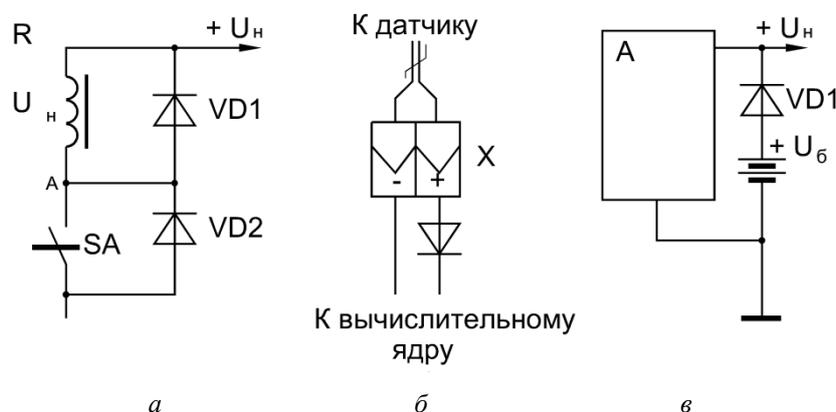


Рис. 2.2. Примеры использования диодов в САУ

Примерами индуктивных нагрузок являются все двигатели, электромагнитные клапаны, силовые электромагниты и т. п. При включении индуктивной нагрузки в ней появляется напряжение самоиндукции, препятствующее нарастанию силы тока, т. е. направленное против напряжения основного питания U_n (см. рис. 2.2, *a*). Таким образом, напряжение U_A на выводе нагрузки оказывается большим номинального напряжения питания. Диод $VD1$ шунтирует это напряжение. При выключении питания сила тока через нагрузку падает. ЭДС самоиндукции, препятствуя падению силы тока, создает на выводе A нагрузки отрицательный потенциал U_A . Диод $VD2$ отводит этот потенциал на землю.

На рис. 2.2, *б* диод предохраняет от ошибок при коммутации витой пары, ведущей к какому-либо датчику на объекте управления. Если неправильно сккоммутировать разъем X , диод не позволит протекать току датчика в противоположном направлении и тем самым повредить какие-либо компоненты вычислительного ядра, на которые поступает сигнал от датчика, либо датчик, если он питается от вычислительного ядра.

На рис. 2.2, в диод VD1 автоматически подключит резервную батарею напряжением U_6 , если внезапно пропадет основное номинальное питающее напряжение U_H .

На обратной ветви вольт-амперной характеристики сила тока сначала очень мала и составляет доли микроампера. Однако при приближении к предельному обратному напряжению, которое называют напряжением пробоя, сила тока резко возрастает и, если ее не ограничить, прибор выйдет из строя. На обратной ветви вольт-амперной характеристики работают полупроводниковые стабилитроны, используемые для получения стабильного опорного напряжения.

Биполярный транзистор. Двойной $p-n$ -переход превратил диод из пассивного прибора в биполярный транзистор, усилитель тока. Типовая топология биполярного транзистора приведена на рис. 2.3, а. На поверхности кремниевой пластины 1 сформирована n -область, являющаяся коллектором, на ней – p -область, являющаяся базой. Внутри базы полупроводник снова перелегирован в n -область. Это эмиттер транзистора. Пластина окислена (слой 2) и на оксид нанесены токопроводящие дорожки 3 (обычно алюминий) толщиной порядка микрометра. В зоне базы и коллектора для получения надежного омического контакта с алюминием полупроводник дополнительно подлегирован (области p^+ и n^+). На рис. 2.3, б приведено схематехническое обозначение биполярного $n-p-n$ -транзистора, на рис. 2.3, в – $p-n-p$ -транзистора.

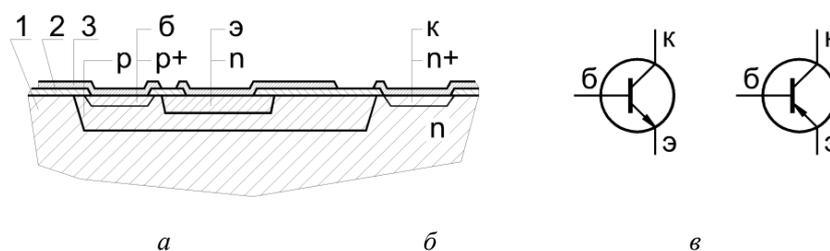


Рис. 2.3. Типовая топология биполярного транзистора (а) и его схематехнические обозначения:

$n-p-n$ -транзистор (б); $p-n-p$ -транзистор (в)

В эмиттере $n-p-n$ -транзистора – избыток электронов, а в базе вакансий электронов – избыток дырок. Электроны диффундируют из эмиттера в область базы, создавая вакансии в эмиттере, так что между базой и эмиттером возникает электрическое поле с потенциалом, препятствующим дальнейшей диффузии. Такое же явление происходит и в базокolleкторном переходе. При наличии на базоэмиттерном переходе напряжения, открывающего этот переход, электроны начинают поступать с эмиттера в область базы. Малая их часть рекомбинирует с вакансиями, создавая ток базы с силой тока I_b . Но в основном, они, смешиваясь с электронами, поступившими в базу из коллектора, формируют коллекторный ток с силой тока I_k , отличающейся от силы тока эмиттера I_e на значение, соответствующее числу рекомбинирующих в базе электронов:

$$I_k = I_e - I_b.$$

Различают три состояния транзистора:

- 1) полностью закрыт (сила коллекторного тока менее микроампера);
- 2) находится в активном режиме, когда сила коллекторного тока пропорциональна силе тока базы;
- 3) полностью открыт, или находится в режиме насыщения.

В активном режиме управляемая сила тока коллектора I_k связана с управляющей силой тока базы I_b соотношением $I_k = h_{21}I_b$, где h_{21} – коэффициент усиления транзистора по току. Коэффициент усиления по току для типовых транзисторов составляет около 100. Этот параметр не очень стабилен, он зависит от температуры транзистора, напряжения между коллектором и эмиттером $U_{кэ}$. Коэффициент усиления по току для супербета-транзисторов может составлять около 1000, для составных транзисторов или транзисторов Дарлингтона, которые рассмотрим далее, он еще больше.

В системах управления транзисторы, как отдельные компоненты, используют в основном в ключах, которые бывают полностью закрыты или полностью открыты, т. е. в состоянии насыщения. На рис. 2.4 показан типовой ключ на биполярном транзисторе, включающий в себя некоторую индуктивную нагрузку R_n , например катушку электромагнитного клапана.

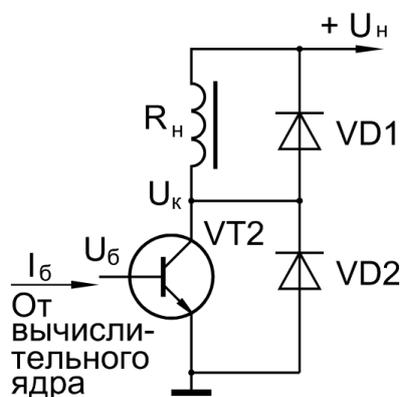


Рис. 2.4. Ключ на биполярном транзисторе

Вычислительное ядро формирует ток базы I_b ключа, при этом фронт сигнала в типичных случаях длится менее микросекунды. Транзистор переходит в активный режим, сила коллекторного тока I_k растет пропорционально силе тока базы. Падение напряжения на нагрузке возрастает пропорционально силе тока коллектора и напряжение на коллекторе падает. На транзисторе в момент переключения рассеивается мощность, которую называют динамическими потерями. Далее наступает момент, когда напряжение на коллекторе U_k становится меньше напряжения на базе. Это и есть состояние насыщения биполярного транзистора. В состоянии насыщения увеличение силы базового тока перестает увеличивать силу коллекторного тока. Напряжение на коллекторе составляет доли вольта. Так, для транзистора КТ3102 оно при силе коллекторного тока в 10 мА составляет всего 75 мВ и менее. Конечно, для силовых ключевых транзисторов и силе тока в несколько ампер это напряжение больше.

Статический коэффициент полезного действия ключа равен отношению мощности, выделяемой в нагрузке, к суммарной мощности, выделяемой в ключе и нагрузке:

$$\eta_k = \frac{I_k(U_H - U_k)}{I_k U_k + I_k(U_H - U_k)} = \frac{I_k(U_H - U_k)}{I_k U_H} = \frac{U_H - U_k}{U_H}.$$

При напряжении на нагрузке в 24 В КПД ключа на биполярном транзисторе в состоянии насыщения реально составляет бо-

лее 96 %. При увеличении напряжения питания нагрузки КПД еще более возрастает. Ключ на биполярном транзисторе имеет три основных недостатка: большую силу тока базы; заметные динамические потери при переключениях; неустойчивое тепловое равновесие.

Обсудим эти недостатки. Коэффициент усиления по току h_{21} , как говорилось ранее, существенно зависит от силы тока коллектора и для силовых транзисторов в состоянии насыщения или близком к нему составляет порядка 5...20. Для повышения коэффициента усиления по току были разработаны транзисторы Дарлингтона.

Транзистор Дарлингтона представляет собой прибор, в котором сформированы два биполярных транзистора, включенных по схеме эмиттерного повторителя (рис. 2.5). На принципиальных схемах такие приборы изображают как обычные биполярные транзисторы.

Коэффициент усиления по току для такой схемы будет равен произведению коэффициентов усиления отдельных транзисторов и составит в активном режиме до 10 000, а в режиме насыщения более 100. Резистор R_6 обычно встроен в схему и необходим для обеспечения линейности схемы в режиме малых токов. При этом базовый ток, открывающий второй транзистор, поступает на него, минуя первый. Для недорогого отечественного транзистора КТ829, выполненного по схеме Дарлингтона и рассчитанного на предельную силу тока в 10 А, сила базового тока в режиме насыщения составляет около 20 мА.

Для ключа, просто включающего или отключающего какой-либо привод, динамические потери незначительны. Они становятся заметными при переключениях на частотах в несколько десятков килогерц. Для уменьшения этих потерь следует применять высокочастотные транзисторы, быстрее переходящие в режим насыщения. Здесь неоспоримое преимущество перед другими высокочастотными транзисторами получают полевые транзисторы, работающие на носителях заряда одного типа, особенно типа n , поскольку отсутствуют потери времени на рекомбинацию носителей.

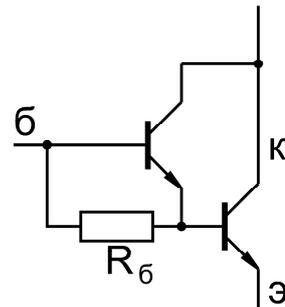


Рис. 2.5. Схема транзистора Дарлингтона

Рассмотрим причины неустойчивости теплового равновесия. Уравнение Эберса – Молла связывает силу коллекторного тока с напряжением на переходе база – эмиттер $U_{бэ}$ и описывает работу транзистора в достаточно широком диапазоне напряжений, сил токов и температур:

$$I_k = I_{нас} \left(\exp\left(\frac{U_{бэ}}{U_T}\right) - 1 \right),$$

где $I_{нас}$ – сила тока насыщения (обратный ток) эмиттерного перехода; $U_T = kT/q$ – энергетический барьер для носителей заряда; k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – абсолютная температура, К; q – заряд электрона ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Реально сила коллекторного тока существенно больше силы тока насыщения эмиттерного перехода, поэтому

$$I_k = I_{нас} \exp\left(\frac{U_{бэ}}{U_T}\right).$$

Казалось бы, согласно уравнению Эберса – Молла, сила тока коллектора должна убывать с повышением температуры, причем экспоненциально, однако это не так. Сила тока коллектора при постоянном напряжении $U_{бэ}$ возрастает пропорционально температуре. Или при постоянном коллекторном токе напряжение на переходе база – эмиттер $U_{бэ}$ падает практически линейно, приблизительно на 200 мВ на каждые 100 °С. Это происходит потому, что сила тока насыщения $I_{нас}$ возрастает с повышением температуры настолько резко, что компенсирует уменьшение экспоненциального члена $\exp(U_{бэ} q/kT)$. Это приводит к неустойчивости теплового равновесия биполярного транзистора. При повышении температуры в какой-либо зоне эмиттерного перехода биполярного транзистора локально возрастает плотность протекающего тока в этой зоне, что приводит к еще большему разогреву рассматриваемого участка и может вызвать выход транзистора из строя.

В связи с этим для повышения силы управляемого тока несколько биполярных транзисторов нельзя включать в цепь парал-

лельно, в то время как полевые транзисторы можно включать параллельно, о чем пойдет речь далее.

Неустойчивость теплового равновесия биполярного транзистора можно повысить, в частности, включив в транзисторную структуру резистивные участки с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), поэтому в качестве ключей для коммутации нагрузки следует применять биполярные транзисторы, рекомендованные для этих целей изготовителями. Кроме того, устойчивость теплового равновесия повышают, применяя радиаторы для охлаждения транзистора. Последовательно с нагрузкой рекомендуется также включать в цепь низкоомный резистор с сопротивлением порядка 0,3 Ом и высоким положительным ТКС.

Если взять два идентичных транзистора, сформированных на одном кристалле и запитать их коллекторным током, причем сила коллекторного тока одного из них в 10 раз больше силы коллекторного тока другого, то согласно уравнению Эберса – Молла для разности напряжений на переходах база – эмиттер получим
$$U_{\text{бэ}2} - U_{\text{бэ}1} = T \frac{\ln 10 K}{q} = 1,986 \cdot 10^{-4} T, \text{ т. е. разность напряжений будет пропорциональна абсолютной температуре. На этом эффекте строят недорогостоящие полупроводниковые датчики температуры, выходной сигнал которых при температуре } 27 \text{ }^\circ\text{C (300 K) равен } 3 \text{ В и имеет крутизну } 10 \text{ мВ/К.}$$

Полевые или униполярные транзисторы – это приборы, управляемые напряжением, а не силой тока, в отличие от биполярных транзисторов. Хотя, строго говоря, и биполярный транзистор также управляется напряжением база – эмиттер, сила тока базы просто необходима для отвода рекомбинировавших в области базы зарядов.

Познакомимся подробнее с работой наиболее часто применяемых в САУ МОП-транзисторов (металл – оксид кремния – полупроводник или MOS – Metal–Oxide–Silicon). Эти транзисторы так же, как и биполярные, широко используются в качестве силовых ключей, аналоговых коммутаторов. Кроме того, в настоящее время они являются основным элементом интегральной схемотехники для обработки цифровой информации.

Тем, кто хочет подробнее ознакомиться с различными типами полевых транзисторов, можно рекомендовать работу [4].

На рис. 2.6 показаны топологическая схема (рис. 2.6, а) и схемотехнические обозначения n -МОП-транзистора. На кремниевой подложке p -типа сформированы две области: сток и исток. В силовых транзисторах (рис. 2.6, в) исток соединен с подложкой. Для этого металлическая пленка, служащая выводом с истока, контактирует и с $p+$ областью. Сток имеет больший потенциал, чем исток.

В других МОП-транзисторах (рис. 2.6, б) подложка часто ни к чему не подсоединена, сток с истоком практически неразличимы и могут подключаться к напряжению любой полярности. Затвор отделен от подложки слоем диоксида кремния толщиной в доли микрометра. При подаче на затвор напряжения в несколько вольт электроны из области подложки концентрируются под затвором и образуют канал проводимости между стоком и истоком. Транзистор начинает проводить электрический ток. При снятии напряжения с затвора ток прекращается.

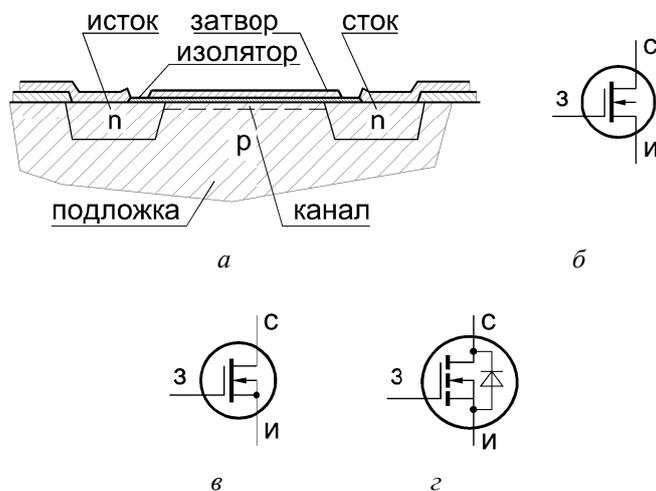


Рис. 2.6. Топология (а) и схемотехнические обозначения n -МОП-транзистора (б–г)

Если исток не соединен с подложкой, транзистор обозначают, как показано на рис. 2.6, б. При этом подложка p -типа за счет обратного тока диодов, образующихся между стоком и

подложкой и истоком и подложкой, приобретает потенциал, примерно на 0,5 В меньше минимального из потенциалов стока или истока. В таких приборах с *n*-каналом принято меньший потенциал присоединять к истоку.

Если исток и подложка имеют контакт внутри прибора (рис. 2.6, *в*), то между стоком и истоком образуется диод, *p*-область которого соединена с истоком. Чтобы подчеркнуть это, иногда прибор на схемах изображают, как показано на рис. 2.6, *г*. На малых частотах работы этот диод не оказывает отрицательного влияния. Более того, он шунтирует отрицательные выбросы при коммутации нагрузки, т. е. не требуется подключения внешнего диода. Однако на частотах переключения порядка 100 кГц и выше из-за него возникают заметные динамические потери. Но они обычно меньше, чем для биполярного транзистора.

МОП-транзистор работает, как управляемое потенциалом переменное сопротивление. Для маломощных элементов, используемых в качестве коммутаторов аналоговых сигналов, сопротивление канала во включенном открытом состоянии составляет десятки ом. При выборе коммутатора нужно всегда оценивать, допустимы ли в данном случае такие потери или нет, и для коммутации использовать релейные решения, несмотря на то что это дороже.

Самое главное, что ТКС канала положителен, поэтому тепловое равновесие внутри прибора устойчиво.

Сопротивление мощных ключевых транзисторов в открытом состоянии может составлять уже доли ома. Статический КПД определяется по формуле

$$\eta_k = \frac{I_C^2 R_n}{I_C^2 R_n + I_C^2 R_o} = \frac{R_n}{R_n + R_o},$$

где I_C – сила тока, протекающего через ключ.

Здесь КПД стремится к единице при высокоомных нагрузках. Применение же биполярных транзисторов при прочих равных условиях выгоднее, как было показано ранее, при высоковольтных нагрузках.

Схема типового ключа на МОП-транзисторе представлена на рис. 2.7. Здесь ВЯ так же, как и на рис. 2.4, гальванически развязано

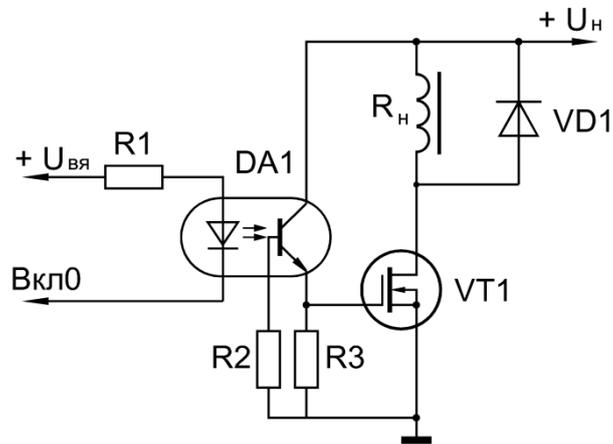


Рис. 2.7. Схема ключа на МОП-транзисторе

от объекта управления и имеет напряжение питания $+U_{вья}$. Если на выводе присутствует логическая единица ($U > 2,4 \text{ В}$), ток через светодиод оптопары DA1 не идет и база фототранзистора не освещена. Резистор R2 ограничивает темновой ток фототранзистора, поэтому на затворе VT1 уровень напряжения близок к нулю и транзистор закрыт.

Напряжение на затворе определяется произведением силы остаточного темнового тока (порядка $0,1 \text{ мА}$) на сопротивление R3. В то же время при сигнале В_кль0, равном нулю, протекающий по резистору R3 ток должен создавать напряжение на затворе, достаточное для надежного открытия ключа, и не перегрузить фототранзистор (как правило, сила тока $10 \dots 20 \text{ мА}$).

IGBT-транзисторы. В большинстве случаев применение биполярных транзисторов оказывается более выгодным не только по экономическим затратам, но и по энергетическим. Достаточно редко встречаются случаи, когда мощные нагрузки питают напряжением менее 24 В . Как правило, это 100 В и более, следовательно, КПД биполярного ключа с низкой стоимостью составит $0,99$ и более. Однако существенный недостаток этих ключей – неустойчивое тепловое равновесие. В конце 80-х годов прошлого века были созданы IGBT-транзисторы (Isolated Gate Bipolar Transistor) – биполярные транзисторы с изолированным затвором, сочетающие в себе независимое от тока нагрузки падение

напряжения на выходном биполярном транзисторе и простоту управления совместно с устойчивым тепловым равновесием полевого. По частотным свойствам IGBT-транзисторы близки к биполярным и имеют допустимые динамические потери при частотах переключения до 100 кГц.

В основе IGBT-транзистора – составной биполярный транзистор, базовый ток которого формируется МОП-транзистором (рис. 2.8). При подаче положительного напряжения на затвор формируется ток между стоком и истоком, поступающий в базу $p-n-p$ -транзистора. Открываясь, этот транзистор формирует ток базы $n-p-n$ -транзистора, а он дополнительно открывает $p-n-p$ -транзистор, поскольку включен между его коллектором и базой. Параметры транзисторов и внутреннего резистора подобраны так, что при снятии напряжения с затвора IGBT-транзистор закрывается. Эмиттер $p-n-p$ -транзистора выполняет функции коллектора IGBT-транзистора, поскольку он подключен к положительному потенциалу. В различных литературных источниках можно встретить разные символические обозначения этого транзистора, например такие, как на рис. 2.8, б–г.

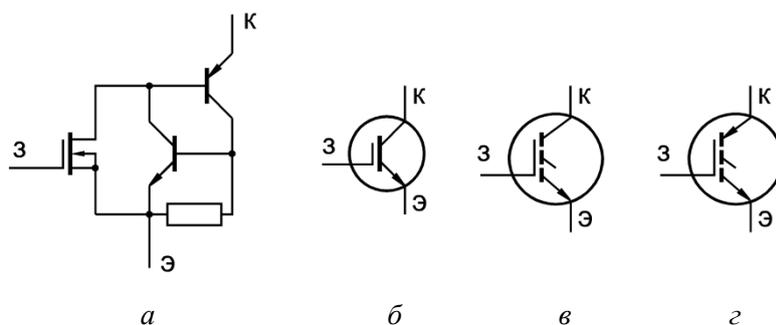


Рис. 2.8. Схема (а) и схематические обозначения IGBT-транзистора (б–г)

Благодаря тому что сопротивление канала имеет положительный ТКС, локального перегрева переходов $p-n-p$ - и $n-p-n$ -транзисторов не наблюдается. При повышении плотности тока в каком-либо месте перехода возрастающая температура приводит к уменьшению силы поступающего туда тока полевого транзистора.

Статический КПД ключа на IGBT-транзисторе рассчитывается так же, как и КПД ключа на биполярном транзисторе:

$$\eta_k = \frac{U_H - U_K}{U_H}$$

IGBT-транзисторы широко используются для изготовления интегральных инверторов–двуполярных ключей, способных формировать положительные или отрицательные импульсы. Трехфазные инверторы применяют для *частотной регулировки* частоты вращения асинхронных электродвигателей. На рис. 2.9 показано формирование одного из трехфазных напряжений (напряжения фазы А).

В таком инверторе переменное трехфазное сетевое напряжение частотой 50 Гц сначала выпрямляется. Затем в течение первого полупериода фазного напряжения управляющие импульсы подаются на затвор одного из двух IGBT-транзисторов (на рис. 2.9 – G2), формируя на выходе А напряжение требуемой полярности (на рис. 2.9 – отрицательной), а в течение второго полупериода – на затвор второго транзистора G1. Заданным периодом фазного напряжения определяется частота вращения двигателя. Частота следования импульсов составляет несколько десятков килогерц (как правило, 20...50 кГц). Ширина этих импульсов t в течение полупериода фазного напряжения выбирается таким образом, что после их фильтрации и сглаживания на индуктивной нагрузке формируется синусоидальное фазное напряжение заданной частоты.

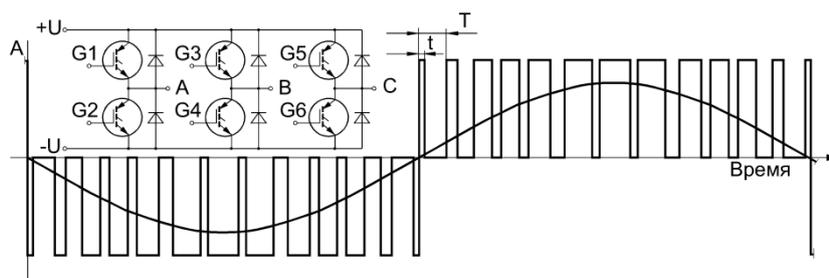


Рис. 2.9. Формирование фазного напряжения IGBT-инвертора

Для регулировки силы тока и напряжения для поддержания момента на валу двигателя, используется скважность импульсов –

отношение длительности импульса t к его периоду T . Таким образом, формируются три фазных напряжения A , B и C , сдвинутых относительно друг друга на 120° .

Управляет инвертором специализированный МК, на вход которого подается управляющий сигнал, определяющий частоту вращения двигателя. МК исходя из заданной частоты вращения рассчитывает длительность импульсов t и управляет затворами IGBT-инверторов. При скалярном управлении поддерживается постоянное отношение заданной частоты и формируемой амплитуды фазного напряжения. Такое управление применяют обычно при слабо меняющихся нагрузках на валу (насосы, вентиляторы и т. п.). В более сложных случаях при переменных и ударных нагрузках применяют уже векторное управление. При этом учитывается положение ротора двигателя. Это сравнительно просто решается введением датчиков углового положения ротора (энкодеров). В современных локальных регуляторах частоты вращения векторное управление реализуют уже без энкодеров благодаря автонастройке и формированию в МК модели конкретного привода, которая и используется для последующего управления инвертором.

Тиристоры и симисторы. Тиристор представляет собой прибор с двумя устойчивыми состояниями с чередованием слоев $p-n-p-n$. На рис. 2.10, *a* представлено его схмотехническое обозначение. При подаче на управляющий электрод положительного потенциала тиристор открывается и сохраняет свое состояние, если управляющий потенциал снят. Для выключения тиристора необходимо снять анодное напряжение. Тиристор, как и диод, проводит ток в одну сторону.

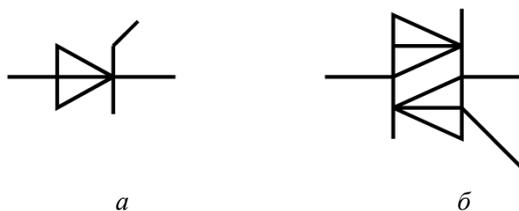


Рис. 2.10. Схмотехнические обозначения тиристора (*a*) и симистора (*б*)

На рис. 2.10, *б* представлено схмотехническое обозначение симистора, по сути являющегося встречно-параллельным включе-

нием двух тиристоров. В нем уже есть семь слоев, он проводит ток в обоих направлениях и хорошо коммутирует переменный ток. Некоторые тиристоры и симисторы не имеют устойчивого состояния и выключаются не при снятии анодного напряжения, а под воздействием управляющего сигнала, поэтому могут коммутировать постоянный ток. Такие приборы со встроенной оптронной развязкой получили название твердотельных реле.

Серийно выпускаются тиристоры и симисторы с силой тока в несколько сотен ампер и напряжением до 1 000 В. В иностранных литературных источниках тиристоры и симисторы обобщенно называют триаками, поэтому в переводных изданиях используется этот термин. Тиристоры и симисторы обычно используют для регулирования мощности в нагрузке. Различают фазоимпульсное и широтно-импульсное управление. При фазоимпульсном управлении (рис. 2.11, а) некоторое устройство, называемое сетевым таймером, фиксирует моменты прохождения сетевого напряжения U_c через нуль и формирует последовательность стробирующих импульсов St . Для формирования требуемой мощности в нагрузке система управления через заданную задержку $t_{зд}$ формирует дискретные управляющие импульсы открытия тиристорных или симисторных ключей Dy . Чем больше задержка, тем меньше будет уровень мощности, выдаваемой в нагрузку. Недостаток фазоимпульсного управления – нелинейность зависимости мощности от времени задержки, хотя МП способен выполнять задачу линеаризации.

При широтно-импульсном управлении (рис. 2.11, б) выбирается некоторый интервал регулирования T , в течение которого на время T_0 нагрузка подключена к сети либо к источнику постоянного напряжения, а на время, оставшееся до конца интервала регулирования, – отключена. Выделяемая в нагрузке мощность составит

$$N = N_m \frac{T_0}{T},$$

где N_m – мощность, выделяемая в нагрузке при подключении к сети либо к источнику постоянного напряжения.

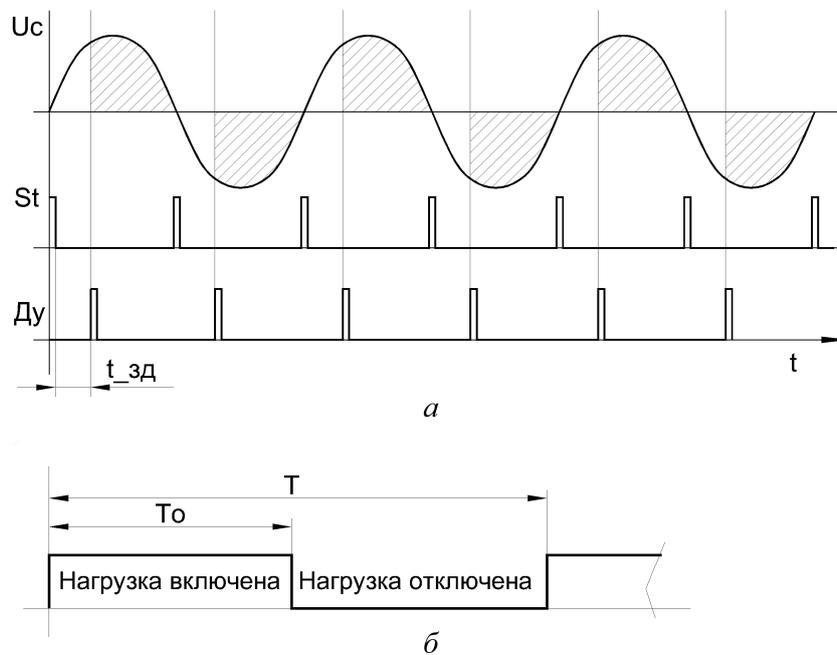


Рис. 2.11. Способы управления симистором:
a – фазоимпульсный; *б* – широтно-импульсный

Таким образом, аналоговое управление реализуется через задачу дискретного управления в заданные периоды времени.

Свето- и фотодиоды, фототранзисторы, оптопары. При определенных условиях энергия рекомбинации электронов и дырок в $p-n$ -переходе выделяется в виде света, а не тепла, как в обычных диодах. Для этих целей используются не монокристаллы кремния, а сложные композитные полупроводники на основе соединений галлия Ga, мышьяка As, фосфора P, индия In, алюминия Al и других химических элементов.

Вольт-амперная характеристика светодиода напоминает приведенную на рис. 2.1 характеристику кремниевого диода. Напряжение прямого падения составляет 1,6...2,4 В (меньшие значения соответствуют красным светодиодам). Номинальная сила тока от нескольких миллиампер. Благодаря безынерционности и хорошей светоотдаче современные светодиоды широко применяются в ка-

честве различных индикаторов – от простейших точечных и семи-
 сегментных символьных индикаторов до цветных дисплеев.

Однако основное применение этих приборов в САУ – оптрон-
 ные развязки в линиях связи с объектом ВЯ и плат УСО. При об-
 лучении $p-n$ -перехода светом в нем образуются пары носителей
 зарядов и вырабатывается ЭДС (вспомните солнечную батарею).
 Так устроен фотодиод. Если облучать базовую область транзисто-
 ра, он может быть переведен в открытое состояние – это фототран-
 зистор. Сочетание светодиода и какого-либо фотоприбора назы-
 вают оптопарой.

На рис. 2.12 приведены различные типы оптопар. Диодная
 оптопара (рис. 2.12, *а*) отличается наибольшим быстродействием,
 но выходной сигнал ее слаб и требует усиления для дальнейшего
 использования в качестве дискретного сигнала. Наибольшее рас-
 пространение в качестве оптронных развязок получили транзи-
 сторные оптопары. На рис. 2.12, *б* приведена транзисторная опто-
 пара без базового отвода. Типовыми параметрами транзисторной
 оптопары является сила тока зажигания светодиода (около 10 мА),
 предельное коллекторное напряжение и сила тока фототранзисто-
 ра (около 30 В и 30 мА) и сила темнового тока фототранзистора,
 т. е. сила коллекторного тока, когда светодиод выключен. Для
 компенсации темнового тока в том случае, когда его наличие кри-
 тично, применяют оптопары с выводом от базы фототранзистора
 (рис. 2.12, *в*). Подключение базового вывода к земле дополнитель-
 но запирает фототранзистор и ограничивает силу темнового тока.
 Симисторные оптопары (рис. 2.12, *г*) на выходе имеют фотосими-
 стор.

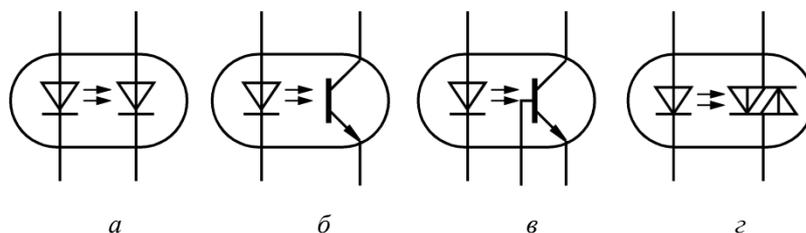


Рис. 2.12. Типы оптопар:

а – диодная; *б* – транзисторная без базового вывода; *в* – транзисторная с выводом
 от базы фототранзистора; *г* – симисторная

В оптопарах источник и приемник сигнала гальванически развязаны и могут питаться разными уровнями напряжения. Типовое напряжение, которое может выдержать изоляция между входными и выходными линиями оптопары, составляет до 1,5 кВ и более. Кроме того, оптопара является хорошей защитой от помех, возникающих от внешних электромагнитных полей. Для зажигания светодиода требуется достаточно высокая мощность (несколько милливольт) и не всякая помеха может обеспечить это. Помимо этого использование в качестве линий связи симметричных витых пар приводит к взаимному уничтожению ЭДС, индуцированных внешней электромагнитной волной (помехой).

Следует помнить, что светодиод, стоящий на входе оптопары, является токовым прибором, т. е. питается током, а не напряжением, и требует при своем подключении к источнику напряжения балластного резистора (R_6 на рис. 2.7). Сопротивление этого резистора рассчитывается исходя из напряжения питания цепи U_p , падения напряжения на светодиоде $U_{сд}$ и номинальной силы тока светодиода $I_{сд}$:

$$R_6 = \frac{U_p - U_{сд}}{I_{сд}}.$$

Силовые приборы с оптронной развязкой широко используются в качестве периферийных компонентов САУ для управления энергетическими потоками. Явно выраженная тенденция интеграции электронных компонентов привела к созданию интегральных ключей на биполярных и униполярных транзисторах, *IGBT*-транзисторах. Это законченные ключи, схематически аналогичные рассмотренным на рис. 2.5 и 2.7, со встроенной защитой от индуктивности нагрузок.

Мощные симисторы с оптоизолированным входом, выключаемые в результате снятия входного сигнала, получили название твердотельных реле и широко используются для коммутации нагрузок при частотах срабатывания ниже 1 кГц.

Контрольные вопросы

1. Опишите характеристики полупроводникового диода и диода Шоттки. Приведите примеры применения.

2. Назовите области применения биполярных транзисторов и составных биполярных транзисторов в САУ.
3. Каковы преимущества и недостатки полевых транзисторов?
4. Перечислите преимущества и недостатки IGBT-транзисторов.
5. Назовите причины теплового пробоя в биполярных транзисторах и равновесия в униполярных.
6. Опишите области применения в САУ тиристоры и симисторы.
7. Назовите типы оптопар и их назначение.

2.2. Операционные усилители

В настоящее время операционный усилитель (ОУ) – основной прибор для аналоговой обработки информации в системах управления и во многих областях аналоговой схемотехники.

Первый интегральный ОУ $\mu A702$, имевший рыночный успех, был разработан Р. Уидларом (США) в 1963 г. В настоящее время номенклатура ОУ насчитывает сотни наименований. Операционные усилители выпускаются в малогабаритных корпусах и имеют очень низкую стоимость, что способствует их массовому распространению. По размерам и цене они практически не отличаются от отдельного транзистора. В то же время преобразование сигнала схемой на ОУ определяется почти исключительно свойствами цепей обратных связей усилителя и отличается высокой стабильностью и воспроизводимостью. Кроме того, благодаря практически идеальным характеристикам ОУ, реализация различных электронных схем на их основе оказывается значительно проще, чем на основе отдельных транзисторов. В связи с этим ОУ почти полностью вытеснили отдельные транзисторы в качестве элементов схем («кирпичиков») во многих областях аналоговой схемотехники.

Операционный усилитель (рис. 2.13) имеет два входа, прямой $+in$ и инверсный $-in$ и выход out . Кроме того, конечно, каждый усилитель имеет цепи питания. Питание ОУ бывает двуполярным ($+U_{cc}$, $-U_{cc}$) или однополярным (0 , $+U_{cc}$). Цепи питания обычно на схемах не показывают, чтобы не затруднять чтение схем. На рис. 2.13, *a* показано функциональное обозначение ОУ, а на 2.13, *б* – обозначение ОУ на принципиальных электрических схемах.

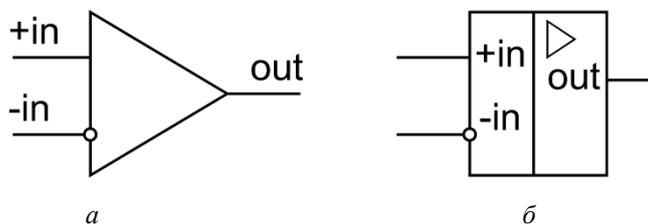


Рис. 2.13. Операционный усилитель:

a – функциональная схема; *б* – схемотехническое обозначение

Идеальный операционный усилитель. Для анализа существующих схем и разработки новых вводится понятие идеального ОУ, т. е. такого ОУ, параметры схемы на котором определяются только цепями обратных связей. Идеальный ОУ обладает:

1) бесконечно большим дифференциальным коэффициентом усиления по напряжению $K_U = \Delta U_{\text{вых}} / (U_{+in} - U_{-in})$ (для реальных ОУ – от 10 тыс. до 100 млн);

2) нулевым напряжением смещения нуля $U_{см}$, т. е. при равенстве входных напряжений выходное напряжение равно нулю (для реальных ОУ $U_{см}$, приведенное ко входу, находится в пределах от 5 мкВ до 20 мВ);

3) нулевыми входными токами (для реальных ОУ – от сотых долей пикоампера до единиц микроамперов);

4) нулевым выходным сопротивлением (для реальных мало-мощных ОУ – от десятков ом до 1...2 кОм); под выходным сопротивлением здесь понимается отношение изменения выходного напряжения к изменению силы выходного тока при различных сопротивлениях нагрузки;

5) мгновенным откликом на изменение входных сигналов (для реальных ОУ время установления выходного напряжения – от нескольких наносекунд до сотен микросекунд).

Большинство современных ОУ могут считаться идеальными.

Основные правила расчета схем на идеальных ОУ.

Первое правило. Входные токи ОУ равны нулю.

Второе правило. На выходе ОУ устанавливается такое напряжение, чтобы напряжения на прямом и инверсном входах сравнялись.

Рассмотрим расчет схемы включения ОУ на примере инвертирующего усилителя (рис. 2.14, *a*). Входной сигнал через резистор

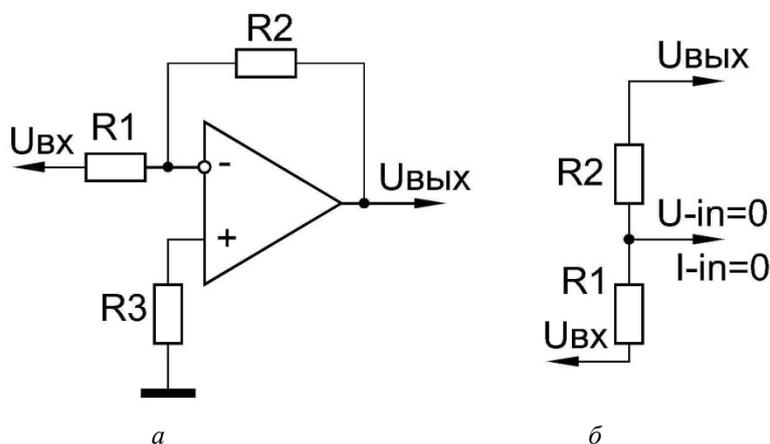


Рис. 2.14. Инвертирующий усилитель:
а – схема включения; б – расчетная схема

$R1$ поступает на инверсный вход. Туда же подключен сигнал отрицательной обратной связи, снимаемый с выхода через резистор $R2$. Поскольку на прямом входе наблюдается нулевое напряжение, согласно второму правилу нулевое напряжение должно быть и на инверсном входе. Тогда, поскольку сила входного тока на инверсном входе I_{in} должна быть равна нулю, согласно расчетной схеме рис. 2.14, б для узла на инверсном входе имеем

$$I_{R1} = I_{R2}; (0 - U_{вх})/R_1 = (U_{вых} - 0)/R_2,$$

где R_1, R_2 – сопротивление резисторов $R1, R2$.

$$\text{Для выходного сигнала получим } U_{вых} = -\frac{R_2}{R_1} U_{вх}.$$

Поскольку выходной сигнал инвертируется (см. знак «-» на рис. 2.14), такой усилитель получил название инвертирующего. Резистор $R3$ компенсирует силу входного тока по прямому и инверсному входам. Его сопротивление принимают равным сопротивлению параллельно включенных резисторов $R1$ и $R2$. Для современных ОУ, особенно выполненных на МОП-транзисторах, силы входных токов очень малы и компенсирующий резистор $R3$ не применяют.

Инвертирующий усилитель широко используется для усиления аналоговых сигналов. Если усиление на нем не превышает

50...100, никаких проблем с неидеальностью реальных ОУ не бывает. Входное сопротивление инвертирующего усилителя равно сопротивлению резистора R1 и от входного сопротивления ОУ практически не зависит.

На рис. 2.15, *a–e* приведены различные широко применяемые в САУ схемы включения ОУ и расчетные формулы, описывающие связь входных и выходных сигналов. Все эти формулы выведены аналогично предыдущим исходя из приведенных выше правил. Рекомендуем освоить эти правила и приемы расчетов схем включения ОУ. Для желающих ознакомиться с применением ОУ более детально рекомендуем работу [4].

Технологии производства ОУ и отличия реальных схем от идеальных. Выше были перечислены основные требования к идеальному ОУ. Коротко повторим их: бесконечно большой коэффициент усиления при разомкнутой обратной связи; нулевая сила входного тока; отсутствие смещения нуля и его температурного дрейфа; нулевое выходное сопротивление; мгновенный отклик на изменение входного напряжения.

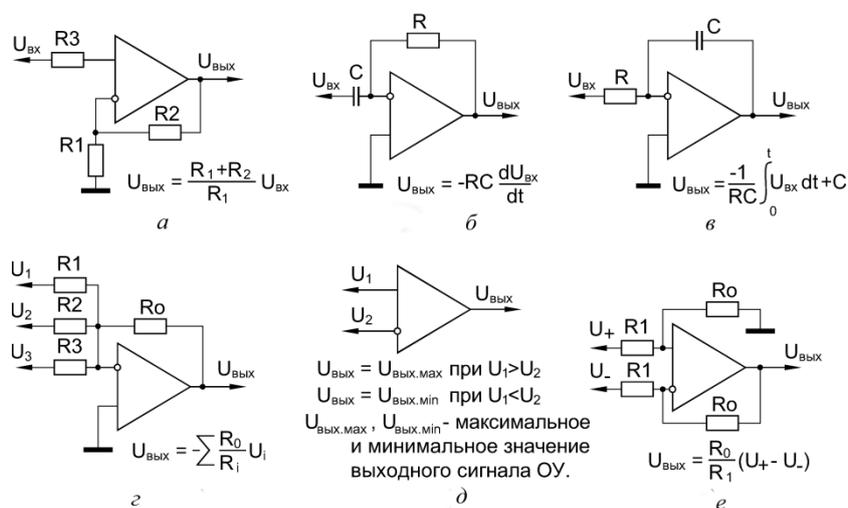


Рис. 2.15. Типовые схемы включения ОУ:

a – неинвертирующий усилитель; *б* – дифференциатор; *в* – интегратор;
г – сумматор; *д* – компаратор; *е* – дифференциальный усилитель

При нулевом выходном сопротивлении достаточно на мгновение закоротить нагрузку и ОУ выйдет из строя. Мгновенный отклик на изменение входного напряжения на практике создает определенные трудности из-за возбуждения схем на высоких частотах. Наиболее существенными достижениями, которые во многом определили прогресс схемотехнических решений и технологий производства ОУ, являются *минимальная сила входного тока* и *отсутствие смещения и температурного дрейфа нуля*. Из практических требований добавим к ним *некритичность* и *наибольшее использование напряжения питания и минимальное внутреннее потребление*. Хотелось бы, чтобы ОУ работал в широком диапазоне питающих напряжений как при двухполярном, так и униполярном питающем напряжении, а входные и выходной сигналы охватывали весь диапазон питающего напряжения.

Минимизация силы входных токов. Первые ОУ были сделаны на биполярных транзисторах, имеющих достаточно большую силу тока базы. Все усилия разработчиков были направлены на ее уменьшение. Появились ОУ с входными каскадами на полевых транзисторах. Сначала это были полевые транзисторы с затвором на *p-n*-переходах. С развитием МОП-технологий появились ОУ, полностью выполненные на полевых транзисторах. Сила входных токов снизилась до наноамперных значений. На одном кристалле стали размещать до четырех каскадов ОУ и более, что относится и к биполярным технологиям. МОП ОУ, как правило, не критичны к питанию, полностью используют его размах по входу и выходу (так называемые *rail-to-rail* усилители, т. е. усилители, выходной сигнал которых не дотягивает до напряжения питания 100 мВ).

Минимизация смещения и температурного дрейфа. МОП-транзисторы технологически воспроизводятся хуже, чем биполярные, и усилители по МОП-технологии при всех их достоинствах не смогли вытеснить с рынка биполярные. Супербета-транзисторы способствовали снижению силы входных токов биполярных ОУ до значения, меньшего микроампера, «подтянули» их к *rail-to-rail*. В ответ появились МОП-усилители с автоматической компенсацией смещения нуля и температурного дрейфа, идея которой состояла в том, что входы усилителя на некоторое время замыкаются, коэффициент усиления устанавливается единичным. На выходе

при этом появляется напряжение смещения. К выходу подключается и заряжается до напряжения смещения эталонный конденсатор. Затем он подключается ко входу и состояние ОУ восстанавливается. Температурный дрейф и смещение нуля оказываются скомпенсированными. Такая операция регулярно проводится автоматически, однако она не всегда допустима. С точки зрения стабильности смещения нуля и температурного дрейфа биполярные ОУ пока лучше, к тому же у них нет такого «врага», как статическое электричество, что упрощает монтаж и пайку на плате, а также последующую эксплуатацию.

Внутреннее потребление ОУ во многом определяется предельной частотой усилителя. Для минимизации внутреннего потребления в обеих технологиях появились так называемые *программируемые ОУ*, силу тока питания которых можно определить и ограничить внешними цепями исходя из требуемых свойств.

На рис. 2.16 показана схема *инструментального усилителя*, выполняющего те же функции усиления разности двух сигналов, что и усилителя, схема которого показана на рис. 2.15, е. Инструментальный усилитель имеет высокие входные сопротивления, поэтому не искажает входных сигналов.

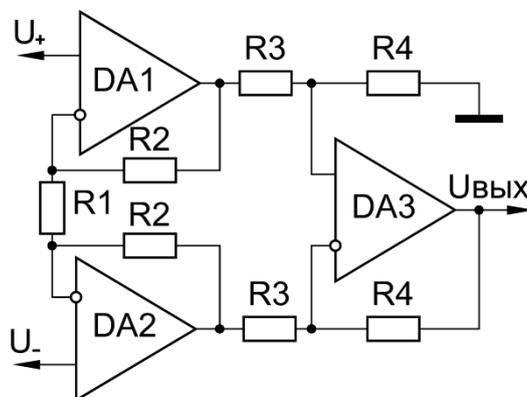


Рис. 2.16. Схема инструментального усилителя

Прежде всего отметим, что все достоинства схемы (см. рис. 2.16) в полной мере могут быть реализованы, если хотя бы два первых ОУ выполнены на одном кристалле. Схема настолько удачна, что выпускается сейчас многими производителями в интегральном

исполнении. В этом случае она действительно проявляет наилучшие свойства, поскольку параметры всех компонентов согласованы. Входные сигналы U_+ и U_- усиливаются в первом каскаде усилителя. При этом, естественно, усиливается напряжение смещения нуля и температурный дрейф. Два резистора R_2 должны быть идентичны. Для выходных напряжений первых каскадов $U_{в+}$ и $U_{в-}$, приложенных к резисторам R_3 , имеем

$$U_{в+} - U_{в-} = \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1}\right) (U_+ - U_-).$$

Сигналы смещения нуля и температурного дрейфа обоих усилителей компенсируют друг друга. Идентичности каналов ОУ можно добиться, выполняя их на одном кристалле. Далее сигналы $U_{в+}$ и $U_{в-}$ поступают на входы рассмотренного ранее дифференциального усилителя, выходной сигнал схемы будет иметь вид

$$U_{вых} = \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3} (U_+ - U_-),$$

При этом также должны быть согласованы резисторы R_3 и R_4 .

В современных интегральных инструментальных усилителях пользователю предоставлена возможность изменять сопротивление резистора R_1 , параллельно присоединяя внешний резистор и увеличивая коэффициент усиления до необходимого значения. Стоимость таких схем относительно небольшая, поэтому они практически полностью вытеснили усилители на отдельных каскадах ОУ в тех случаях, когда требуется усиливать разностный сигнал.

В заключение хотелось бы отметить, что в настоящее время разработаны и поставляются специализированные блоки аналоговой обработки информации различных датчиков, которые выдают стандартные выходные сигналы, метрологически проверены и аттестованы в Российской Федерации и за рубежом.

Все большее распространение получают и универсальные схемы обработки аналоговой информации, носящие название ФРАА (Field Programmable Analog Arrays). Это массивы операционных и инструментальных усилителей, резисторов и других це-

пей коррекции сигналов, которые могут программно коммутироваться и настраиваться в процессе работы. Коммутация осуществляется полевыми транзисторами с плавающими затворами (см. устройство репрограммируемых постоянных запоминающих устройств в разд. 2.4).

Контрольные вопросы

1. Проанализируйте параметры идеального и реального операционного усилителя.
2. Опишите связь технологии производства и параметров ОУ.
3. Приведите правила расчета ОУ на примере неинвертирующего усилителя.
4. Как построить дифференциаторы и интеграторы на операционных усилителях?
5. Приведите вывод формулы коэффициента усиления инструментального усилителя.

2.3. Технологии и типовые элементы для обработки дискретной информации. Комбинационные логические схемы

Элементы для обработки дискретной информации подразделяют на две большие группы: комбинационные логические схемы (КЛС) и последовательностные схемы. В КЛС выходной сигнал определяется входом, в последовательностных схемах – входным сигналом и состоянием схемы. Входных и выходных сигналов может быть несколько. Под входным или выходным сигналом будем подразумевать некоторый вектор X или Y . КЛС – это группа логических вентилях, в основе которых логические операции НЕ, И, ИЛИ, «исключающие ИЛИ» и их сочетания. Последовательностная схема образуется введением в КЛС обратных связей, КЛС служит основой для их построения. Далее изучим основы построения КЛС, необходимые для практического использования.

Интегральная схемотехника лишь тогда смогла добиться потрясающих результатов, когда смогла освободиться от инерции схемотехнических решений для дискретных компонентов. Впервые схемотехники поверили в нее, когда появилась транзисторно-

транзисторная логика (ТТЛ) и соответствующая ей технология их производства – ТТЛ-технология.

Транзисторно-транзисторная логика и ТТЛ с диодами Шоттки (ТТЛШ). Основу ТТЛ составляет многоэмиттерный транзистор (рис. 2.17) – элемент, не слишком нужный в качестве отдельного дискретного компонента. Если на обоих входах X1 и X2 высокий уровень сигнала, ток, протекающий через резистор R1 и базово-эмиттерный переход транзистора VT1, попадает в базу транзистора VT2 (рис. 2.17, а).

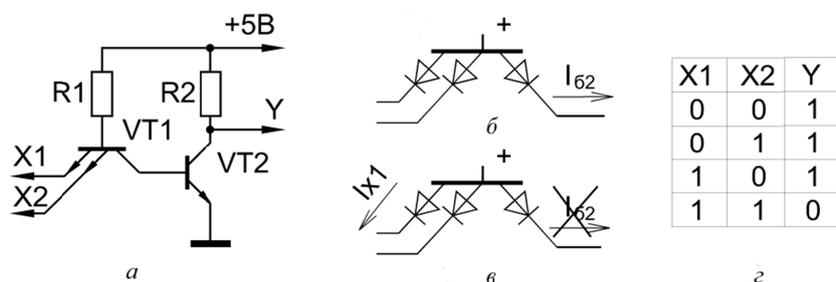


Рис. 2.17. Схема ячейки И-НЕ транзисторно-транзисторной логики:

а – упрощенная принципиальная схема ячейки; б – схема диодного эквивалента VT1 при высоком уровне сигналов X1, X2 на обоих эмиттерах; в – схема диодного эквивалента VT1 при низком уровне сигнала X1; г – таблица истинности ячейки

На рис. 2.17, б и 2.17, в показан диодный эквивалент многоэмиттерного транзистора VT1. Если на входах X1 и X2 высокий уровень сигнала, транзистор VT2 оказывается открыт и входит в состояние насыщения, так как на его базу поступает ток с силой I_{62} . На коллекторе формируется низкий уровень сигнала (менее 0,6 В, уровень нуля), так как все напряжение при протекании коллекторного тока падает на резисторе R2. Как только на одном из входов X появляется низкий уровень сигнала (см. рис. 2.17, в), ток начинает протекать через соответствующий эмиттерный переход (типичное значение силы тока 0,25 мА). Ток базы транзистора VT2 пропадает и транзистор закрывается. За счет этого напряжение на коллекторе возрастает практически до напряжения питания, что соответствует сигналу, равному единице. В таблице истинности (рис. 2.17, г) приведены значения входов X1, X2 и выхода Y. Как видно из таблицы, получился элемент И-НЕ.

Реальная схема ТТЛ-элемента сложнее. В открытом состоянии (в «нуле») коллектор транзистора VT2 способен принять достаточно большую силу тока (10 мА и более), а в закрытом (в «единице») – выходной ток создает заметное падение напряжения на резисторе R2. Уменьшение сопротивления резистора R2 приведет к перегрузке выходного транзистора, поэтому для повышения нагрузочной способности в закрытом состоянии добавляют еще один каскад из двух синфазно работающих транзисторов (один открыт, другой закрыт).

Представленная на рис. 2.17 схема ТТЛ-элемента, несмотря на упрощения, отражает основные свойства этой логики:

входы схемы не потребляют, а отдают ток;

выход схемы в нуле потребляет ток; нагрузочная способность достаточно высока;

выход схемы в единице выдает ток; нагрузочная способность ниже, чем в нуле;

в нуле выходной каскад находится в состоянии глубокого насыщения.

Схема и технология ее реализации достаточно просты, а топология не может быть компактной. Почему же по ТТЛ-технологии делают только схемы малой степени интеграции? Все дело в рассеиваемой на элементе мощности, которая слишком велика. Для обеспечения высокого быстродействия требуются большие токи, чтобы быстро вывести транзисторы из состояния глубокого насыщения.

ТТЛШ-логика не позволяет транзисторам входить в состояние глубокого насыщения за счет того, что коллекторно-базовый переход шунтирован диодом Шоттки. Как было сказано ранее, это диод на переходе металл – низколегированный полупроводник. Если металлизацию базы биполярного транзистора распространить на коллекторную зону, такой диод получится автоматически, т. е. база замкнется с коллектором диодом Шоттки. Этот диод имеет малое падение напряжения в прямом направлении и не позволяет на коллекторе иметь напряжение ниже базового более чем на 0,3 В, т. е. ограничивает состояние насыщения транзистора. Имеется три семейства ТТЛШ-вентилей: быстродействующая (531 серия – при таком же токе потребления, как и для ТТЛ, имеет примерно в 3 раза меньшее время переключения), экономичная (555 серия – при таком же быстродействии ток потребления в 4 раза меньше) и улучшенная (серия 1533 – большее быстродействие и в 3–4 раза

меньший ток потребления). Типичное время переключения серии 1533 (наиболее распространенной) – около 10...15 нс. Серия 1533 является аналогом зарубежной серии ALS.

МОП-логика. Исторически первыми появились *p*-МОП БИС. На основе таких схем в 70-е годы прошлого века были созданы первые микропроцессорные комплекты С5-11 и одноплатные отечественные микроЭВМ, по сути, прообразы современных МК. Основным недостатком *p*-МОП-логики – сравнительно малое быстродействие, поскольку носителями заряда являются дырки. На смену *p*-МОП-логике быстро пришла *n*-МОП-логика. Начало 70-х годов прошлого века: микропроцессор Intel 8008 и микропроцессор Intel 8080 (отечественный аналог – микропроцессорный комплект К580) – это первые *n*-МОП БИС. Для электропитания эти схемы требовали не одно значение напряжения, а целый набор: +5 В, ±12 В, причем напряжения должны были подаваться в определенной последовательности, хотя частоты переключений уже были в пределах нескольких мегагерц. Чуть позже были разработаны и выпущены улучшенные *n*-МОП-серии, требующие единственного 5-вольтового питания. Сейчас *n*-МОП-технология – основная технология выпуска недорогих БИС общего применения.

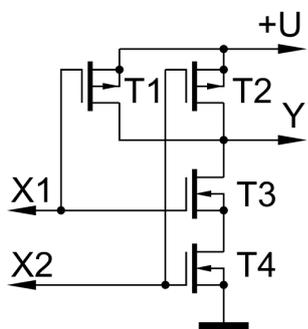


Рис. 2.18. Схема ячейки И-НЕ *k*-МОП-логики

Комплементарные *k*-МОП-логика и *k*-МОП-технология оперируют уже полевыми транзисторами с каналами *p*- и *n*-типа. Характерной особенностью этих приборов является практически нулевой ток потребления, если схема находится в состоянии покоя и не переключается. Частота переключений соответствует уровню *n*-МОП. На рис. 2.18 показана упрощенная схема элемента И-НЕ, функциональный аналог которой приведен на рис. 2.17, а.

Чтобы перевести выход *Y* в состояние логического нуля (напряжение менее 0,8 В), следует открыть оба транзистора Т3 и Т4. Для этого необходимо подать единицы (напряжение более $+U/2$) на оба входа X1 и X2. При этом оба транзистора Т1 и Т2 закроются. При снятии высокого уровня сигнала хотя бы с одного из входов, закрывается

соответствующий n -канальный транзистор и откроется комплементарный ему p -канальный. Выход перейдет в состояние логической единицы и напряжение на нем будет близко к напряжению питания $+U$.

Выход k -МОП-логики симметричен относительно подвода питания и представляет собой комплементарную пару МОП-транзисторов. В нуле открыт n -, а в единице p -канальный транзистор, поэтому нагрузочная способность этой логики в отличие от ТТЛ и ТТЛШ одинакова и весьма велика.

Долгое время k -МОП-логику преследовал эффект тиристорного защелкивания. Иногда, чаще всего при включении электропитания, оказывались открытыми оба выходных транзистора и схема перегорала. В настоящее время тиристорный эффект устранен и отечественные схемы серии 1554 являются k -МОП-аналогами серии ТТЛШ 1533, причем имеют более высокую нагрузочную способность, равные силы токов, принимаемых в нуле и выдаваемых в единице. Кроме того, эти схемы менее требовательны к электропитанию. Серия 1554 является технологическим аналогом зарубежной серии 74АС.

Существуют и иные технологические серии ИС, такие как эмиттерно-связанная логика, интегрально-инжекционная логика и др. Для анализа и разработки систем автоматического управления необходимо знать об особенностях входов и выходов. Обобщенные сведения приведены в таблице.

Сигнал	Вход ТТЛШ	Выход ТТЛШ	Вход k -МОП	Выход k -МОП
Ноль	Выдает около 200 мкА	Принимает около 20 мА	Потребление мало	Принимает около 40 мА
Единица	Принимает около 200 мкА	Выдает около 1 мА	Потребление мало	Выдает около 40 мА

Типовые КЛС в САУ. Оформление их выходов. С помощью интегральных вентилях часто совершают элементарные операции над информацией на периферии САУ перед вводом ее в ВЯ, чтобы уменьшить число линий и разгрузить ядро от рутинных операций.

На рис. 2.19 показаны примеры типовых логических элементов. Вверху приведены обозначения вентилях в отечественной литературе и технической документации, под ними – обозначения, встречающиеся в зарубежной литературе, ниже – контактно-

релейный эквивалент вентиля, далее – его логические функции и, наконец, таблицы истинности, описывающие связь входов и выхода. Инверсию на выводе логического элемента обозначают маленьким кружком. На ячейках И, обозначаемых прямоугольником, символ & допускается не проставлять, на ячейках ИЛИ символ «1» обязателен.

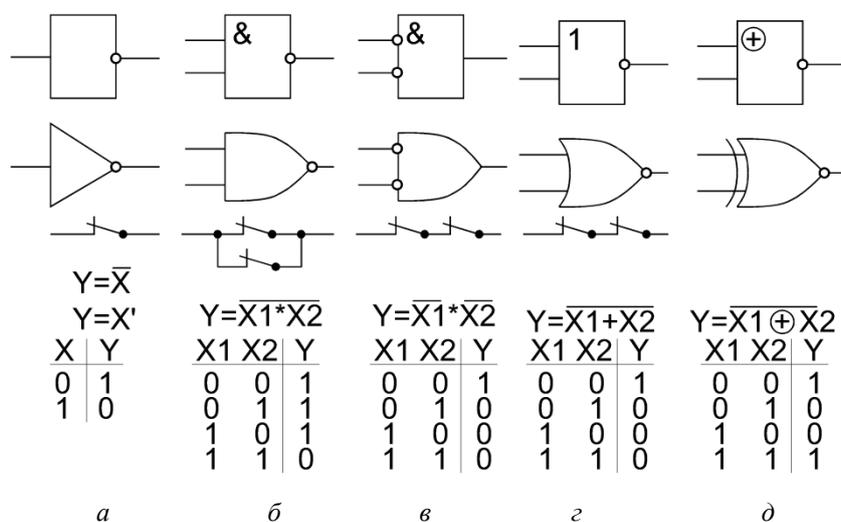


Рис. 2.19. Отечественные и зарубежные схемотехнические обозначения, их контактно-релейные эквиваленты, логические формулы и таблицы истинности типовых КЛС:

a – инвертор; *б* – ячейка 2И-НЕ; *в* – ячейка 2НЕ-И; *г* – ячейка 2ИЛИ-НЕ; *д* – ячейка «исключающее ИЛИ-НЕ»

Выход вентиля «открытый коллектор». Часто выходы отдельных вентилях объединяют и подключают к цепи питания +U (рис. 2.20). При этом, если хотя бы на одном выходе установлен нуль (выход вентиля открыт), нуль устанавливается и на общем выходе. Такое соединение называют «монтажным ИЛИ», хотя, строго говоря, формируется операция И. Очевидно, этот термин возник во время релейной логики, когда замкнутые контакты считались единицей, а разомкнутые – нулем, т. е. за логическую единицу принимался физический нуль (отсутствие падения напряжения). Если подобным образом соединить выходы тради-

ционных элементов, параллельно окажутся включенными транзисторы (см. рис. 2.18) выходных каскадов ячеек. Но если на выходе какого-либо элемента – единица, транзисторы T1 или T2 будут открыты и при появлении нуля на выходе другого элемента (открыты T3 и T4) через открытые транзисторы начнет протекать чрезмерно большой ток, который выведет их из строя.

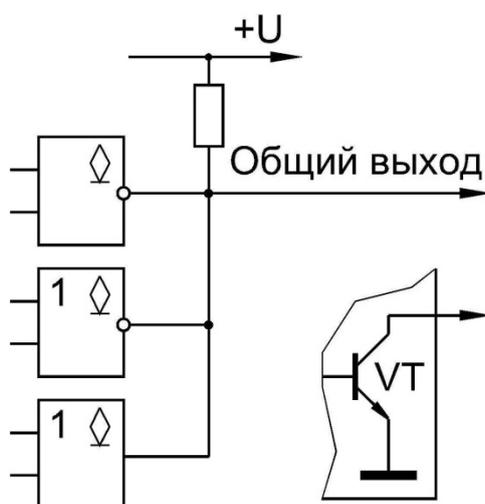


Рис. 2.20. Параллельное подключение выходов ячеек с открытым коллектором

Для параллельного подключения выходов применяют вентили с открытым коллектором. В них на выходе существует лишь один транзистор, коллектор которого подключен только к выводу элемента. Отбросьте в схеме на рис. 2.17 резистор R2 и получится выход «открытый коллектор». Вентили с открытым коллектором обладают в 1,5 – 2 раза меньшим быстродействием по сравнению с типовым выходом, поэтому применять их необоснованно не следует.

Трисктабильный выход. Этот выход приспособлен для организации подключения к общей шине. Обратимся вновь к проблеме параллельного подключения нескольких выводов к одному проводу, однако цель подключения – другая. Элементы поочередно должны работать с шиной при получении ими разрешения. Так подключены ячейки памяти к шине данных и другие элементы шинной архитектуры, являющейся основой современных компьютеров.

Обозначение и функциональная схема тристабильного элемента приведены на рис. 2.21, *а*, *б*. Тристабильный элемент имеет три вывода: вход, выход и управляющий вход. Выход тристабильного элемента может находиться в трех состояниях: «ноль», «единица»

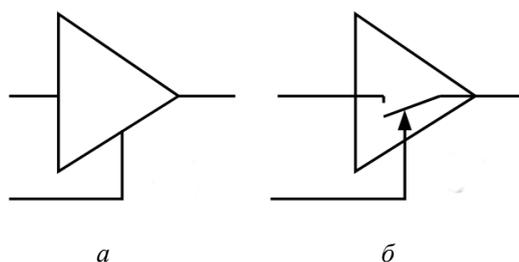


Рис. 2.21. Тристабильный элемент:

а – обозначение; *б* – функциональная схема

или «разомкнуто». Третье состояние возникает в случае, когда «контакт» в функциональной схеме на рис. 2.21, *б* разомкнут. Это состояние называют также высокоимпедансным, т. е. в нем выход имеет высокое (единицы и даже десятки мегаом для *k*-МОП-схем) сопротивление как на шину питания, так и на землю. Для упрощения это состояние называют также *Z*-состоянием. Тристабильные элементы применяют, как правило, в составе выходных каскадов ИС.

Выпускаются типовые логические вентили как ИС малой и средней степени интеграции. При этом в одном корпусе компонуются несколько вентилях, чаще всего однотипных. Например, 4-2И-НЕ – это 14-выводная ИС, содержащая четыре двухвходовых вентиля И-НЕ (4×3 и два вывода питания). Обозначается она следующим образом: К1533ЛА3 или К1554ЛА3, где К – тип корпуса; 1533, 1554 – номера серий (ТТЛШ или *k*-МОП), ЛА3 – функциональное обозначение.

Специализированные КЛС выполняют широко распространенные функции. **Буферы** служат для усиления входных или выходных сигналов и подключения к шинам. Однонаправленный буфер АП5 выпускается в сериях 1533 и 1554 и представляет собой две отдельно управляемые четверки триггеров Шмидта с тристабильным выходом и повышенной нагрузочной способностью. На рис. 2.22, *а* приведено символическое обозначение в принципиальных

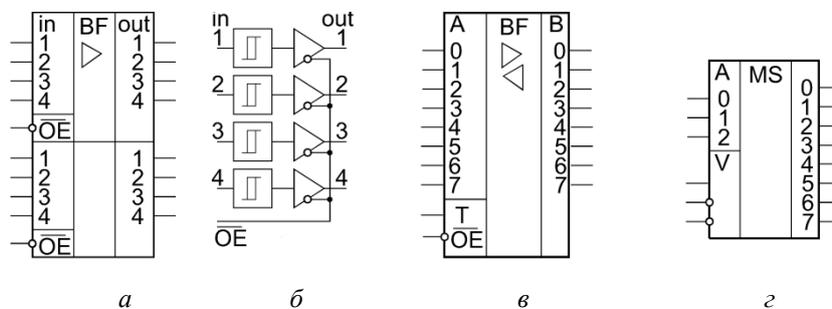


Рис. 2.22. Специализированные КЛС:

a – однонаправленный буфер АП5; *б* – функциональная схема четверки каналов буфера АП5; *в* – двунаправленный буфер АП6; *г* – дешифратор 3×8 ИД7

электрических схемах, а на рис. 2.22, *б* – функциональная схема одной четверки. Триггер Шмидта служит для очистки сигнала от помех и защиты от ложных переключений. Этот триггер имеет порог переключения из нуля в единицу больший, чем из единицы в нуль. При подаче на вывод OE (Output Enable, разрешение выхода) активного низкого уровня на выходах *out* устанавливаются уровни сигнала, соответствующие входным сигналам. Если уровень сигнала на выводе OE высокий, на выходах – Z-состояние. Схема упакована в 20-выводном корпусе (16 входов-выходов, 2 разрешения и 2 вывода питания).

На рис. 2.22, *в* показан двунаправленный буфер АП6. При высоком уровне сигнала на выводе OE стороны А и В разорваны. При подаче на вывод OE активного низкого уровня сигнала стороны А и В соединяются, причем направление передачи сигнала зависит от состояния вывода Т. Если на нем высокий уровень сигнала, информация передается от А к В, а если низкий уровень, наоборот, – от В к А. Схема также упакована в 20-выводном корпусе.

Дешифратор 3×8 ИД7 (рис. 2.22, *г*) при получении разрешения устанавливает низкий уровень сигнала на том из восьми своих выходов, номер которого соответствует двоичному числу, пришедшему на адресные входы. Чаще всего их применяют в качестве дешифраторов памяти. Адресные входы присоединяются к шине адресов МП или МК. При обращении к памяти дешифратор выбирает своим активным выводом устройство, адрес которого выставлен на шине адресов, и переводит его в активное состояние. Все рассмотренные ИС выпускаются в ТТЛШ- и *k*-МОП-сериях.

Контрольные вопросы

1. Как различаются выходные параметры схем транзисторно-транзисторной логики и ТТЛ с диодами Шоттки.
2. Каковы преимущества и недостатки МОП-логики в сравнении с ТТЛ и ТТЛШ?
3. Назовите типовые КЛС и области их применения в САУ. Приведите типы оформления их выходов.
4. Что такое специализированные КЛС, каковы их назначение, технологические и схемотехнические решения?

2.4. Последовательностные схемы

В основе последовательностных схем, выход которых Y определяется сигналами на входах X и прошлым состоянием схемы, лежат КЛС, охваченные обратными связями. Все, что ранее было сказано о технологических сериях, оформлении и нагрузочной способности выводов КЛС, относится и к последовательностным схемам (ПС).

Интегральные триггеры. Элементарной ПС является RS-триггер, представленный на рис. 2.23, рядом приведена таблица его состояний. Она отличается от таблицы истинности КЛС (см. рис. 2.17, z) тем, что при некоторых значениях входных воздействий выход определяется прошлым состоянием. Допустим, после включения на выходе Q установилась единица, тогда на нижнюю ячейку ИЛИ-НЕ придет ноль, и если входы S и R исходно будут в нуле, на выходе \bar{Q} будет ноль. Это – исходное состояние схемы после включения. В данном случае трудно определить, какое оно будет, поскольку все зависит от сравнительного быстродействия ячеек. Состояние входов «единица – единица» здесь запрещено и выход не определен.

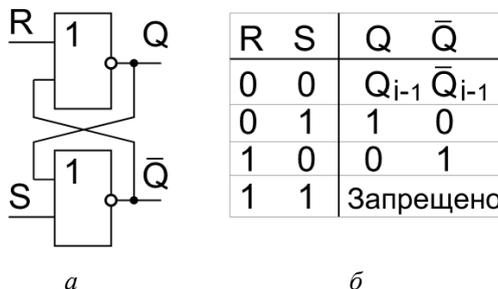


Рис. 2.23. RS-триггер (а) и его таблица состояний (б)

RS-триггеры выпускаются в интегральном исполнении и имеют функциональное обозначение ТР. Так, триггер 1533ТР2 включает в себя четыре RS-триггера с инверсными входами (активен низкий уровень), выполненных по ТТЛШ-технологии. В основе этих триггеров – ячейки 2И-НЕ. Попробуйте нарисовать и объяснить работу такого триггера.

Асинхронные и синхронные, статические и динамические триггеры. Триггеры делятся на асинхронные, т. е. переключаемые в любой момент времени, и синхронные, момент переключения которых задается специальным разрешающим входом – входом синхронизации. Синхронные триггеры бывают статическими, когда разрешение на переключение задается уровнем напряжения на входе синхронизации, и динамическими, когда переключение происходит по фронту или спаду сигнала на входе синхронизации. На основе триггеров строятся различные счетчики, регистры, схемы памяти и т. д.

Регистры. Эти ИС служат в САУ для хранения информации. Их используют, например для подачи и хранения сигналов дискретного управления.

Схемотехническое обозначение статического регистра ИР22 и функциональная схема одной его ячейки приведены на рис. 2.24, а и б. Схема состоит из статического синхронного D-триггера и тристабильного элемента. Восемь ячеек регистра имеют общие входы

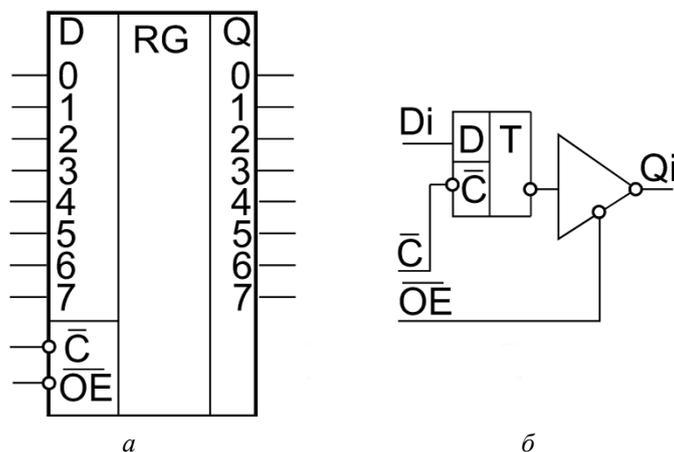


Рис. 2.24. Схемотехническое обозначение (а) и функциональная схема одной ячейки (б) статического регистра ИР22

синхронизации и разрешения выхода. Выпускается она в серии ТТЛШ и k -МОП. Нетрудно догадаться, что запись в регистр осуществляется при низком уровне на входе синхронизации, но содержимое \overline{D} -триггеров появляется на выходе только после перевода вывода \overline{OE} в активное низкое состояние.

Регистр ИР28 является динамическим аналогом регистра ИР22. Запись информации осуществляется по фронту импульса синхронизации. Для того чтобы записать информацию, необходимо на входах D выставить требуемые уровни сигналов, затем сформировать отрицательный импульс на входе синхронизации и при его окончании (появлении на фронте перехода из нуля в единицу) информация будет переписана в регистр. Такие регистры удобно подсоединять к типовым МП. Линию записи \overline{WR} МП, а она активна в низком уровне, можно присоединять непосредственно к выводу синхронизации C .

Схемы памяти. Речь пойдет не о памяти вообще, а об электронных схемах памяти. Память делят на постоянную или масочно-программируемую, репрограммируемую и оперативную. В постоянное или масочно-программируемое ПЗУ программный код зашивается в процессе его производства и не может быть изменен. Такие ИС применяют для устройств массового применения при стабильной программе выпуска. В САУ технологическим оборудованием ПЗУ применяют редко.

Репrogramмируемые постоянные запоминающие устройства (РПЗУ) программируются у пользователя. Основу современных РПЗУ составляет МОП-транзистор с плавающим затвором (рис. 2.25). Плавающий затвор ни к чему не присоединен и находится в слое оксида кремния под основным управляющим затвором.

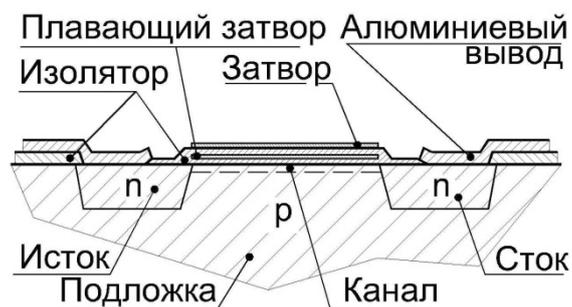


Рис. 2.25. Топология МОП-транзистора с плавающим затвором

При подаче на управляющий затвор положительного напряжения около 20...25 В электроны с подложки диффундируют через изолятор (оксид кремния SiO₂) и собираются на плавающем затворе. При этом их электрическое поле блокирует действие управляющего затвора и состояние МОП-транзистора уже изменить нельзя, он все время будет закрыт. Заряд на плавающем затворе сохраняется десятилетия и все это время схема памяти будет хранить записанный в ней код.

Для стирания информации необходимо снять заряд с плавающего затвора. Это делают двумя способами – облучением кристалла ультрафиолетовым излучением и подачей на подложку положительного напряжения относительно управляющего затвора.

Для того чтобы ультрафиолетовое излучение попало на оксид, в корпусе ИС над кристаллом делают кварцевое окошко, прозрачное для ультрафиолетовых волн. Около 20 мин под ультрафиолетовой лампой – и схема все «забыла». Стирать можно только все сразу. Запись информации осуществляется побайтно. Причем время записи составляет уже не десятки наносекунд, как для схем статического ОЗУ, которые рассмотрим далее, а миллисекунды. При емкости памяти в десятки и сотни килобайт это уже заметное время. Программирование проводят в специальных программаторах, для чего схема должна выниматься из платы, поэтому такие РПЗУ размещают в специальных колодках. Схемы с ультрафиолетовым стиранием носят индекс РФ. Схемотехническое обозначение ИС с ультрафиолетовым стиранием приведено на рис. 2.26.

Для считывания информации необходимо задать адрес ячейки, затем выбрать кристалл, активизировав вывод \overline{CS} , и подать разрешение выдачи \overline{OE} . Содержимое адресуемой ячейки появится на выводах D0–D7.

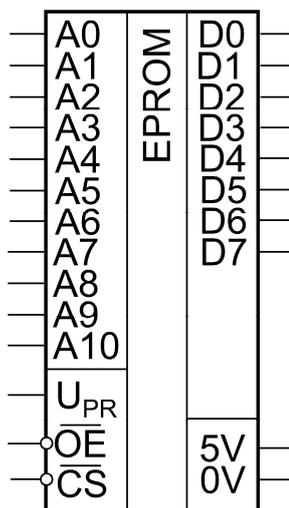


Рис. 2.26. Схематехническое обозначение ИС с ультрафиолетовым стиранием

Существуют однократно программируемые схемы. В них прозрачное окошко отсутствует, поэтому они значительно дешевле.

Схемы с электрическим стиранием информации обозначают символами PE. Они построены аналогично схемам с ультрафиолетовым стиранием. Стирание также проводится по всей схеме либо блоками путем подачи повышенного напряжения на подложку. Стирание, как и программирование, проводится в специальном программаторе и сопряжено с удалением схемы из платы.

Стремление упростить процесс перепрограммирования РПЗУ привело к созданию флэш-памяти. В основе ячейки флэш-памяти – также транзистор с плавающим затвором, однако слой оксида под ним столь тонок (порядка 100 нм), что 5 В достаточно, чтобы плавающий затвор зарядился. Схема флэш-памяти может программироваться непосредственно на плате, но для этого нужна специальная программа, позволяющая многократно записывать информацию в ячейки. Стирание также проводится блоками либо целиком, но в отличие от электрически стираемого РПЗУ оно осуществляется непосредственно на плате.

В настоящее время использование флэш-памяти – широко распространено. На основе схем флэш-памяти выполняют флэш-диски, все активнее вытесняющие традиционные дисковые накопители, особенно в системах управления, в которых, как правило, не требуется хранить очень большие объемы информации, но требуется повышенная надежность. Особенно достоинства флэш-дисков проявляются при использовании в подвижных объектах, в которых гироскопический эффект традиционных дисковых накопителей приводит к повышенным нагрузкам на опоры.

Циклы стирания РПЗУ с ультрафиолетовым стиранием информации сопряжены с облучением оксида и накоплением в нем дефектов. При записи диффузия электронов через оксид также не проходит бесследно для его качества, поэтому первые РПЗУ не выдерживали более десяти циклов перезаписи. Число циклов перезаписи для схем флэш-памяти составляет уже сотни тысяч. На первый взгляд это очень много, но, если флэш-память эмулирует диск, может оказаться и не достаточно. Операционная система может весьма активно использовать и нагружать дисковое пространство.

Разработаны специальные операционные системы, ориентированные на применение на флэш-дисках. Это флэш-ДОС, специальные версии Neutrino и др. Они равномерно загружают все дисковое пространство, не создавая временных файлов в одной и той же области.

Схемы оперативной памяти ОЗУ или памяти с произвольным доступом (Random Memory Access – RAM) бывают статические и динамические. Основу ячейки динамической памяти составляет сформированный на кристалле конденсатор, заряд на котором, если он есть, должен с некоторой периодичностью обновляться. Наличие или отсутствие заряда на конденсаторе идентифицирует нуль или единицу. Схемы динамической памяти формируют основной массив памяти современных персональных компьютеров. В настоящее время много информации поступает из различных источников о новых разновидностях этой памяти; схемах, позволяющих совмещать чтение и запись; многопортовых ОЗУ и т. п. Но в системах управления стараются применять более надежные статические ОЗУ, ячейки которых устроены так же, как ячейки регистра (см. рис. 2.24, б). При одной и той же стоимости динамические ОЗУ на порядок и более объемней или при одном и том же объеме – на порядок дешевле.

Схемотехническое обозначение статического ОЗУ на 2 Кбайт приведено на рис. 2.27. Для того чтобы считать информацию из памяти, сначала следует выставить адрес требуемой ячейки. Дешифратор памяти, управляющий памятью МК (вспомните ИД7), активизирует соответствующую схему, подав активный низкий уровень сигнала на \overline{CS} . Затем следует, удерживая высокий уровень сигнала на выводе $\overline{W/R}$, подать активный низкий уровень сигнала на разрешение вывода \overline{OE} . С задержкой в несколько десятков наносекунд от спада этого импульса содержимое адресуемой ячейки появится на выводах схемы D0–D7 и поступит на шину данных МК.

Для записи информации сначала ее и адрес ячейки следует выставить на шину данных и адресов. Дешифратор активизирует схему низким уровнем сигнала на \overline{CS} . Затем, удерживая высокий уровень сигнала на \overline{OE} , следует подать

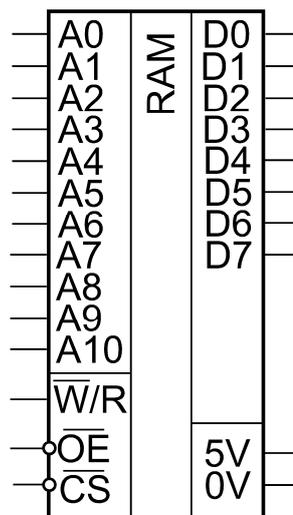


Рис. 2.27. Схематическое обозначение статического ОЗУ

отрицательный импульс на \overline{W}/R , после чего по его фронту будет записана информация в соответствующую выставленному адресу ячейку памяти.

Микропроцессор (микроконтроллер) сам проводит описанные здесь циклы по командам чтения и записи. Важно, чтобы такт записи-чтения МП по временным промежуткам соответствовал допустимым задержкам для схемы памяти. В этом следует предварительно убедиться по соответствующей документации.

ИС статической памяти, выполненные по k -МОП-технологии, способны хранить содержимое при снятии основного электропитания. Такие схемы называют энергонезависимыми ОЗУ. Для перевода схемы в режим хранения достаточно на выводе \overline{CS} поддерживать уровень логической единицы. Из предыдущего раздела известно, что потребление k -МОП-схем при отсутствии переключений крайне мало. Также ведут себя и схемы статической памяти. Потребление с вывода \overline{CS} составляет несколько микроампер. Даже доли микроампера из литиевой батарейки, подключенной к этому выводу, хватает на очень долгое время. В персональном компьютере статическое ОЗУ используется в схеме часов, в которой хранятся дата и начальные установки компьютера. Приходилось ли вам менять батарейку в компьютере?

Сегнетоэлектрическое ОЗУ (FRAM). Ядром сегнетоэлектрической оперативной памяти являются сегнетоэлектрические кристаллы, которые позволяют законченным FRAM-изделиям работать подобно ОЗУ, обеспечивая хранение данных без внешнего энергопотребления. Когда электрическое поле прикладывается к сегнетоэлектрическому кристаллу, его центральные атомы смещаются и остаются в этом положении при снятии поля. Свойства конденсатора, роль диэлектрика в котором выполняет сегнетоэлектрическая пленка, меняются и ячейка памяти изменяет свое состояние.

Емкость современных интегральных FRAM-изделий (например, FM1608, выпускаемых фирмой Ramtron) составляет 64 Кбайт и более.

Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Это микросхемы с переменной структурой, содержащие набор ячеек КЛС и последовательностных схем. Комбинации соединения этих ячеек могут быть различными и задаются пользователем. Таким образом, конкретная управляющая схема создается внутри этих схем.

Первые ПЛИС появились в начале 70-х годов прошлого века. Фирма Texas Instruments выпустила программируемые с помощью маски ИС, в которых связи между различными ячейками задавались на последних этапах технологии. На поверхность чипа в вакууме наносили сплошную тонкую металлическую пленку, на которой с помощью фоторезистивного слоя формировался рисунок, определяющий требуемое соединение ячеек. Затем пленку стравливали с тех мест, где фоторезистивный слой не был экспонирован и задублен. Такие ИС выполнялись заказными, их функции устанавливал заказчик, но они не могли быть оперативно изменены в процессе эксплуатации.

Последующее совершенствование ПЛИС шло по пути повышения степени интеграции, совершенствования структуры размещения ячеек и создания устройств, которые могли бы оперативно изменять структуру, т. е. программироваться пользователем. Металлические перемычки были заменены ключами на МОП-транзисторах с плавающим затвором (см. рис. 2.25) или на МОП-транзисторах, управляемых встроенным или внешним РПЗУ.

В настоящее время наибольшее распространение получили ПЛИС, построенные по архитектуре FPGA (Field Programmable Gate Array). Они состоят из логических блоков и коммутирующих путей – программируемых матриц соединений. Логические блоки таких ПЛИС включают в себя программируемые мультиплексоры, D-триггеры, а также цепи управления на КЛС. В современных ПЛИС емкостью до одного миллиона эквивалентных вентилях число логических элементов достигает нескольких десятков тысяч. Настройка логических блоков и их взаимная коммутация осуществляются с помощью коммутирующих путей с ключами на МОП-транзисторах. Их затворы управляются встроенным или внешним статическим ОЗУ или РПЗУ.

БИС FPGA широко применяются в системах управления для создания УСО. Так, каналы дискретного контроля и управления контроллеров и плат УСО фирмы Fastwel выполнены на БИС FPGA. Каждая БИС может быть перепрограммирована в процессе работы и реализовать 24 канала контроля-управления, измерять длительность импульсов по ряду каналов, осуществлять широтно-импульсное управление. В первом случае БИС выполняет функции набора регистров, доступных для записи и чтения с системной шины контроллера, во втором случае – функции автономных счет-

чиков, запускаемых фронтом импульса и останавливаемых спадом, в третьем случае формирует управляющие импульсы заданной длительности с определенной частотой.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение асинхронных и синхронных, статических и динамических триггеров в САУ?
2. Перечислите типы, состав, назначение, примеры использования регистров.
3. Как устроены и работают различные схемы памяти: РПЗУ, динамическое и статическое ОЗУ, энергонезависимое ОЗУ?
4. Приведите состав, особенности структуры и применение ПЛИС.

2.5. Средства цифроаналоговой обработки информации

Эти схемы используют одновременно информацию в цифровом и аналоговом виде и служат в САУ для коммутации аналоговых сигналов (коммутаторы) для преобразования информации из цифрового представления в аналоговое (цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) (DAC – Discreet-Analog Converters) и из аналогового в цифровое – аналого-цифровые преобразователи (АЦП) (ADC – Analog-Discreet Converters).

Цифроаналоговые преобразователи служат для преобразования сигнала, представленного в цифровой форме в аналоговое представление. Информация о значении в дискретном виде представляет собой некоторое многоразрядное двоичное число. Например, в десятиразрядном двоичном числе можно задать значение от нуля до 1023 в прямом коде или от -512 до $+511$ в дополнительном. Прежде всего следует определиться, какому диапазону аналогового сигнала соответствует диапазон изменения двоичных чисел. Для этого используется опорное напряжение преобразования U_{ref} , значение которого соответствует диапазону изменения информации в цифровом виде. Цену одной дискреты двоичного разряда (младшего бита) U_d и значение выходного аналогового сигнала U_a можно определить по формулам, зная разрядность представления n и значение сигнала в дискретной форме N :

$$U_d = \frac{U_{ref}}{2^n}; U_a = U_d N.$$

Основой ЦАП является суммирующий усилитель (см. рис. 2.15, з). Если на все входы через аналоговые ключи подать опорное напряжение, а отношения сопротивлений входных резисторов R_i к сопротивлению резистора обратной связи R_o принять $1/2$ для первого входа, $1/4$ для второго и так далее, получим ЦАП. Ключами следует управлять с помощью разрядов преобразуемого двоичного числа N .

Недостатком такой схемы является очень большой разброс номинальных сопротивлений резисторов. В связи с этим их неудобно выполнять в интегральном исполнении, поэтому входную цепь делают в виде резистивной матрицы, получившей название R-2R, которая выполняет те же функции, что и входная цепь, но содержит лишь резисторы, отличающиеся вдвое по номинальным сопротивлениям.

Очень важным элементом ЦАП является источник опорного напряжения U_{ref} . От его точности и температурной стабильности непосредственно зависит точность задания выходного сигнала.

В настоящее время выпускается множество ИС ЦАП, отличающихся целым рядом параметров: во-первых, разрядностью преобразования от восьми до двадцати четырех разрядов; во-вторых, способом ввода информации. Преобразуемое число, управляющее ключами ЦАП, хранится в регистре. Регистр может быть с параллельным вводом информации, подобный изображенному на рис. 2.24, и с последовательным вводом информации. В первом случае информация в регистр заносится с шины данных за один такт, а во втором информация в ячейки записывается побитно. Это, конечно, дольше, но не требует большого числа выводов. Различаются ЦАП и по быстродействию, т. е. по времени установления выходного сигнала после изменения состояния. Достаточно малое время преобразования чаще всего не оказывает решающего влияния на выбор ЦАП.

Аналого-цифровые преобразователи служат для преобразования сигнала, представленного в аналоговой форме, в цифровое представление, как правило, для последующей обработки его в вычислительном ядре САУ.

Прежде всего АЦП характеризуются разрядностью и точностью преобразования. Точность обычно соответствует младшему разряду преобразования, хотя погрешность многоразрядных АЦП может быть и больше. Так же, как и для ЦАП, помимо внутренних

характеристик точность непосредственно зависит от точности задания опорного напряжения.

По времени преобразования АЦП делятся на сверхбыстрые, быстрые и медленные. Сверхбыстрые реализуют параллельное преобразование и преобразуют за один такт, быстрые – реализуют метод поразрядного взвешивания и преобразуют за число тактов, равное разрядности преобразования, а медленные АЦП выполняют преобразование методом двойного интегрирования или реализуют дельта-сигма-преобразование.

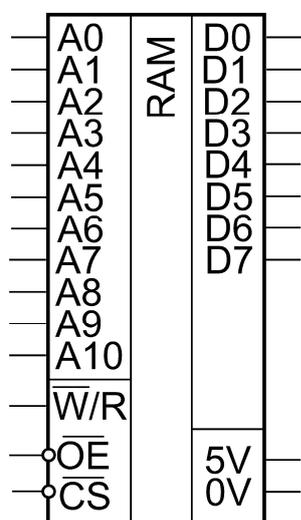


Рис. 2.28. АЦП поразрядного взвешивания

АЦП параллельного преобразования состоит из резистивного делителя, задающего уровни напряжения, соответствующие двоичному n -разрядному числу и набора компараторов, сравнивающих преобразуемую величину A_{in} с этими уровнями. В простейшем случае, когда преобразование – одноразрядное, достаточно одного уровня и одного компаратора. При 8-разрядном преобразовании потребуется уже 255 компараторов и задатчик 255 уровней, т. е. сложность схемы растет быстрее, чем 2^n , где n – разрядность преобразователя. ИС АЦП параллельного преобразования выполняют обычно 8 – 12-разрядными. При этом

типичное время преобразования составляет порядка 100 нс.

АЦП поразрядного взвешивания содержат формирователь кода, его обычно называют регистр последовательного приближения (РПП), цифроаналоговый преобразователь и компаратор К (рис. 2.28). Получив сигнал на начало преобразования Start, преобразователь начинает его осуществлять.

Компаратор сравнивает входной сигнал A_{in} с выходным сигналом ЦАП O_{dac} (пока ячейку Т/Н во внимание не принимаем). На выходе компаратора будет нуль, если входной сигнал A_{in} меньше выходного сигнала ЦАП, и единица – в противном случае. Таким образом, последовательно увеличивая содержимое

РПП, пока выход компаратора в нуле, получим в регистре тот первый код, аналоговый эквивалент которого превысит значение A_{in} . Поставленная задача решена, однако весьма неэффективно. Этот процесс можно упростить.

Вспомним старую притчу о поиске фальшивой монеты, которая чуть легче остальных. Поделим кучу монет на две части и сравним их массу, затем более легкую снова поделим пополам и т. д. Воспользуемся методом половинного деления для нахождения дискретного числа, чей аналоговый эквивалент наиболее близок к A_{in} . Для простоты допустим, что преобразование восьмиразрядное. Наибольшее число, размещаемое в байте – 255 или 11111111_2 , его половина 128 или 1000000_2 . Если выход компаратора окажется в нуле, ищем число в верхней половине и устанавливаем на ЦАП $128 + 64 = 192$ или 1100000_2 , если в единице – ищем в нижней половине: ЦАП:=64 или 0100000_2 . Снова наблюдаем выход компаратора и так до самого младшего разряда.

Как видно из изложенного, закономерность при обработке каждого разряда очевидна. Устанавливаем разряд в единицу. Если выход компаратора – в нуле, обнуляем разряд и переходим к младшему разряду, если иначе – переходим сразу к младшему разряду. Запишем этот алгоритм как процедуру на языке Паскаль. Как видно, алгоритм весьма прост, он реализован аппаратно в специальном регистре последовательных приближений РПП (см. рис. 2.28) и запускается при подаче сигнала Start.

Но если в процессе преобразования цифруемый сигнал A_{in} заметно изменится, процесс может не сойтись, поэтому на входе АЦП поразрядного взвешивания предусматривают специальную ячейку аналоговой памяти Т/Н (Track end Hold). В начале преобразования ключ (см. рис. 2.28) на МОП-транзисторе на короткое время (несколько десятков наносекунд) замыкается, конденсатор С заряжается до A_{in} и затем хранит заряд, поскольку входное сопротивление усилителя ячейки Т/Н велико. Таким образом, запомнив преобразуемую величину, в процессе преобразования будем удерживать ее неизменной, гарантируя сходимость процесса.

Об окончании преобразования сообщает сигнал Ready, который в начале преобразования устанавливается в нуль, а в конце вновь восстанавливается в единицу. Теперь содержимое РПП рав-

но коду преобразуемой величины и его можно считывать, используя сигнал чтения (\overline{RD}), по которому выходы регистра переводятся из высокоимпедансного состояния в активное.

Достаточно малое время преобразования (единицы микросекунд), удобное сопряжение с МП, высокая точность и разрядность наряду с относительно низкой стоимостью обуславливают наибольшее применение в современных САУ АЦП поразрядного взвешивания. Их отличает ряд особенностей, во-первых, разрядность (от 8 до 24 разрядов), во-вторых, АЦП, как и ЦАП, бывают с параллельным и последовательным вводами информации. Причем многоразрядные АЦП, как правило, выполняют с последовательным вводом. Последовательный канал для ввода преобразуемого числа также выполняют по-разному. Чаще всего это синхронная или асинхронная радиальная линия. Различаются АЦП и по быстродействию, т. е. по времени преобразования (от единиц до нескольких десятков микросекунд). Часто АЦП имеют встроенный источник опорного напряжения U_{ref} , который заметно облегчает использование ИС, поскольку он должным образом согласован с точностью и разрядностью преобразования.

Интегрирующие АЦП содержат интегратор, генератор и счетчик импульсов и компаратор, сравнивающий значение преобразуемого напряжения A_{in} с выходным напряжением интегратора. При получении сигнала на начало преобразования обнуляются интегратор и счетчик. Интегратор начинает интегрировать сигнал опорного напряжения, а счетчик ведет счет импульсов генератора до тех пор, пока выходное напряжение интегратора не превзойдет значение сигнала A_{in} . Полученный результат и является цифровым значением аналогового сигнала A_{in} . Он существенно зависит от долговременной стабильности генератора, поэтому в настоящее время используют в основном метод двойного интегрирования, в котором удается устранить этот недостаток. При этом методе входной сигнал A_{in} интегрируется в течение определенного числа импульсов задающего генератора N_0 . Это предельное значение, до которого может считать счетчик. Затем, как только счетчик переполнится, начинает интегрироваться опорное напряжение обратной по отношению к входному сигналу полярности. Счетчик при этом, после переполнения, начинает

считать с нуля и продолжает счет до тех пор, пока выходной сигнал интегратора не обнулится. Содержимое счетчика представляет собой цифровой эквивалент входного сигнала A_{in} . Попробуйте самостоятельно доказать это.

Время преобразования АЦП двойного интегрирования составляет уже десятки миллисекунд. Такие АЦП широко используются в настоящее время в различных тестерах, индикаторах и других приборах, где быстродействие не критично. Они недороги и часто снабжены светодиодным или жидкокристаллическим индикатором.

Дельта-сигма-преобразователи относятся к классу интегрирующих преобразователей. По принципу действия и параметрам они сходны с АЦП двойного интегрирования. Интегратор в течение времени, определяемого разрядностью счетчика, интегрирует то разности входного сигнала A_{in} и опорного напряжения U_{ref} , то только входные сигналы, так чтобы на выходе интегратора был сигнал, близкий к нулю. Причем в выходном счетчике импульсы считаются лишь в те моменты времени, когда суммируются разности A_{in} и U_{ref} . Код, накопившийся за время преобразования в счетчике, представляет собой цифровой эквивалент аналогового сигнала.

Интегрирующие преобразователи (двойного интегрирования и дельта-сигма-преобразователи) следует применять там, где требования к точности и разрядности высоки, а к времени преобразования не критичны.

На рис. 2.29 приведена классификация АЦП.

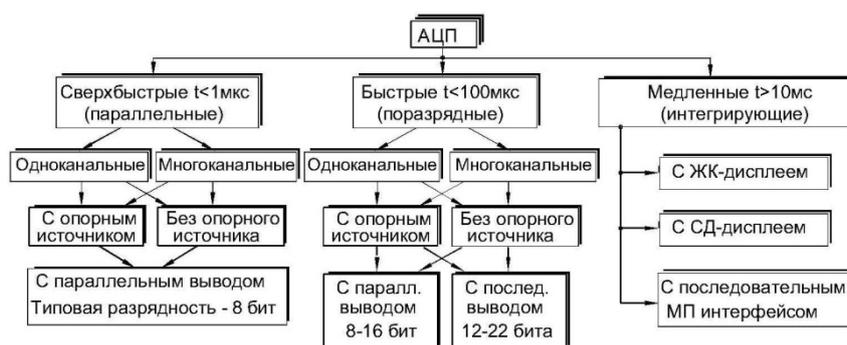


Рис. 2.29. Классификация АЦП

Контрольные вопросы

1. Из каких элементов состоит ЦАП? Как они подключены?
2. Как следует классифицировать АЦП?
3. Что такое АЦП параллельного действия и поразрядного взвешивания?
4. Как работают и где применяются медленные АЦП: АЦП двойного интегрирования, дельта-сигма-преобразователи?

ЛИТЕРАТУРА

1. *Волчкевич Л.И.* Автоматизация производства электронной техники: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1988. 285 с.
2. *Остром К., Виттенмарк Б.* Системы управления с ЭВМ: Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 480 с.
3. *Денисенко В.В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия – Телеком, 2009. 608 с.
4. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: В 3 т. Т. 1: Пер. с англ. М.: Мир, 1993. 413 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Элементная база и структура САУ	13
1.1. Вариантность элементной базы САУ и возможности реализации различных функций	13
Контрольные вопросы	33
1.2. Этапы внедрения вычислительной и микропроцессорной техники в САУ технологическим оборудованием	33
1.3. Микроконтроллер – основная структурная единица аппаратного обеспечения САУ	36
Контрольные вопросы	51
1.4. Последовательный процесс – основная структурная единица программного обеспечения САУ	52
Контрольные вопросы	64
1.5. Структура программного обеспечения и основы программирования микроконтроллеров	64
Контрольные вопросы	72
Глава 2. Электронные компоненты САУ	73
2.1. Дискретные электронные компоненты САУ	73
Контрольные вопросы	91
2.2. Операционные усилители	92
Контрольные вопросы	99
2.3. Технологии и типовые элементы для обработки дискретной информации. Комбинационные логические схемы	99
Контрольные вопросы	108
2.4. Последовательностные схемы	108
Контрольные вопросы	116
2.5. Средства цифроаналоговой обработки информации	116
Контрольные вопросы	122
Литература	122

Учебное издание

Рябов Владимир Тимофеевич

**КОМПЛЕКСНАЯ РАЗРАБОТКА
МЕХАНИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОННЫХ
И ПРОГРАММНЫХ КОМПОНЕНТОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Часть 1. Функции, структура и элементная база
систем автоматического управления**

Редактор Л.С. Горбенко

Корректор Р.В. Царева

Компьютерная верстка А.Ю. Ураловой

Подписано в печать 08.11.2012. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 7,21. Тираж 200 экз. Изд. № 70. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.