

МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное
пособие
для высших
учебных
заведений

МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ
ОБОРУДОВАНИЕМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ



МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Под редакцией заслуженного деятеля
науки и техники РСФСР,
профессора А. А. САЗОНОВА

*Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования
в качестве учебного пособия
для студентов приборостроительных
специальностей вузов*

БИБЛИОТЕКА
Вух. ТИП и ЛП
№ 3089

Москва
«Радио и связь»
1988

ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектроника как новое научно-техническое направление электроники решает проблему создания высоконадежной, экономичной и миниатюрной радиоэлектронной аппаратуры, вычислительной техники и систем автоматизации при широком наборе выполняемых функций и большом объеме перерабатываемой информации.

Активное внедрение электроники для управления машинами и оборудованием требует ежегодного выпуска огромного количества интегральных микросхем (ИМС). Для обеспечения выпуска сотен миллионов ИМС на одном заводе нужно, чтобы используемое технологическое оборудование было автоматизировано и работало, как правило, в составе робототехнических комплексов и гибких автоматизированных систем.

В настоящее время автоматизация управления технологическим оборудованием микроэлектроники ведется на основе последних достижений микроэлектроники — микропроцессорной техники. В истории развития и совершенствования микропроцессоров можно выделить три основных этапа. Микропроцессоры первого поколения (1971—1975 гг.) имели относительно низкую производительность и несовершенную архитектуру. Микропроцессоры второго поколения (1976—1978 гг.) характеризовались более совершенной архитектурой, повышенной производительностью и использованием более передовой технологии их изготовления. Наконец, с 1979 г. по настоящее время интенсивно развивается производство и использование третьего поколения микропроцессоров — 16- и 32-разрядных высокопроизводительных устройств, ориентированных на решение сложных задач в реальном масштабе времени и имеющих запоминающие устройства большой емкости.

Широкая номенклатура выпускаемых микропроцессоров, их многофункциональность и быстроедействие позволяют успешно решать задачи автоматизации управления сложным технологическим оборудованием микроэлектроники с многоуровневым управлением в рамках гибких автоматизированных систем.

Одновременно с развитием микропроцессоров разрабатываются алгоритмы управления оборудованием и программное обеспечение микропроцессорных систем управления, что обеспечивает непрерывное внедрение микропроцессорной техники в автоматизацию управлением технологическим оборудованием микроэлектроники.

Глава 1. УПРАВЛЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

1.1. СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Управление технологическими процессами в любой отрасли промышленности должно обеспечивать получение продукции с определенными свойствами. Решение этой задачи основывается на понимании взаимосвязи между свойствами изделия, особенностями технологии его изготовления и характеристиками оборудования, с помощью которого реализуется эта технология.

Производство интегральных микросхем представляет собой сложный многостадийный процесс, в котором можно выделить три фазы:

заготовительную, включающую в себя изготовление слитков, резку их на пластины и получение пластин со скрытым слоем, подготовку оснастки и инструмента (фотошаблонов, транспортной и технологической тары, реактивов и др.) и, наконец, производство корпусов, специальных лент, паучков для сборки приборов;

обрабатывающую, предназначенную для получения интегральных структур в полупроводниковом материале или на его поверхности;

сборочно-контрольную, завершающую изготовление ИМС. В нее входят операции: разделение пластин на кристаллы, сборка схем в корпус, герметизация, контроль качества изделий и испытания.

Основные характеристики ИМС, определяющие область их применения, создаются обрабатывающей фазой. Она предъявляет особо высокие требования к точности и стабильности технологических процессов и условиям их выполнения. Все это наряду с большим разнообразием методов и приемов обработки приводит к необходимости решения сложных задач управления и разработки совершенных технических средств, поэтому в дальнейшем будут анализироваться лишь процессы обрабатывающей фазы.

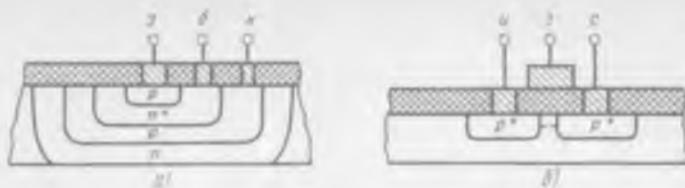


Рис. 1.1. Схемы транзисторов:

а — биполярного (з — эмиттер; б — база; к — коллектор); б — МДП (и — исток; з — затвор; с — сток)

Технология обрабатываемой фазы получила название планарной и в основном сформировалась в конце 50-х, начале 60-х годов. Планарная технология позволила получать качественные интегральные структуры при высоком выходе годных. Кроме того, эта технология универсальна, пригодна для производства разнообразных приборов, допускает изменение состава операций, что обеспечивает возможность построения гибких автоматизированных производств. Последнее особенно важно для такой быстроразвивающейся отрасли, как микроэлектроника.

По планарной технологии изготавливают в настоящее время большинство биполярных и МДП-схем. Основу ИМС, как известно, составляют микротранзисторы (рис. 1.1, а, б). В биполярной схеме необходимые свойства получаются за счет создания $p-n-p$ - или $n-p-n$ -транзисторов и их соединения. Для разделения схем друг от друга используется изоляция диэлектриком или обратносмещенными $p-n$ -переходами.

В МДП-приборах необходимые свойства обеспечиваются на границе металл-диэлектрик-полупроводник. Канал с управляемой проводимостью (затвор) при подаче потенциала изменяет электрический ток между истоком и стоком, что и используется для получения эффекта усиления.

С целью выявления общности методов изготовления ИМС сопоставим планарные технологии получения биполярных и МДП-приборов. Все числовые значения, характеризующие транзисторные структуры и приведенные в описании технологий, указаны ориентировочно.

Технология биполярных схем. В планарной технологии существуют различные методы получения ИМС. Они различаются способами изоляции элементов друг от друга и формирования транзисторных структур. Рассмотрим планарно-эпитаксиальную технологию, получившую широкое распространение в промышленности. Последовательность операций ее приведена на рис. 1.2.

Исходным материалом при изготовлении биполярных ИМС служат пластины кремния диаметром 60...150 мм, толщиной 0,2...0,4 мм с удельным сопротивлением 1...10 Ом·см. Пластины при запуске в производство объединяются в партии (операция 1) по 10...50 шт. и в дальнейшем обрабатываются на одном и том же оборудовании одновременно или поочередно. Свойства пластин, включаемых в партию, не должны существенно отличаться друг от друга.

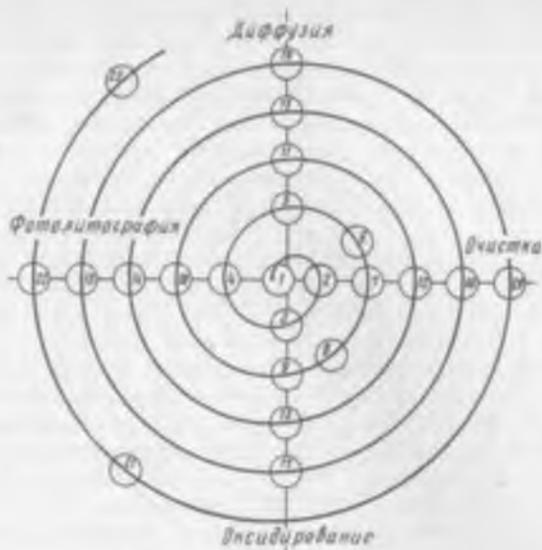


Рис. 1.2. Структурно-технологическая схема изготовления планарно-эпитаксиальных ИМС

Очистка (операция 2) проводится с целью подготовки пластин кремния к последующим операциям. С поверхности удаляются механические загрязнения, химически не связанные с поверхностью, загрязнения, полученные в результате побочных реакций, а также слой с нарушенной кристаллической структурой, возникающий при механической обработке пластины. Качество очистки строго контролируется.

После очистки проводят первое оксидирование (операция 3). Оно необходимо для того, чтобы создать маскирующий слой диоксида кремния толщиной около 1 мкм. Слой получают путем оксидирования пластин в атмосфере сухого или влажного кислорода при температуре 1150°С. Температура должна поддерживаться с погрешностью не хуже $\pm 1^\circ\text{C}$.

Следующим этапом является фотолитография (операция 4). Она предназначена для создания окон в маскирующем слое диоксида кремния. Основным требованием к качеству технологического процесса является высокая точность размеров получаемых окон, расстояний между ними и ровность краев линий, образующих рисунок схемы (топологию). Линейные размеры элементов и расстояние между ними в ИМС могут составлять доли микрометра.

Диффузия (операция 5) должна обеспечить получение хорошо проводящего слоя n^+ под коллектором с удельным сопротивлением $\rho = 8 \dots 10 \text{ Ом}/\square$. Он создается путем диффузии мышьяка или сурьмы на глубину 1...2 мкм. Диффузия проводится в две стадии: «загонка» при температуре 800...900°С и «разгонка» с оксидированием при температуре 1000...1100°С. Погрешность стабилизации температуры в рабочем объеме не должна превышать $\pm 0,5^\circ\text{C}$, а состав газа, пропускаемого через реактор, должен быть постоянным.

После диффузии проводится снятие оксида (операция 6) и поверхность подготавливается путем очистки (операция 7) к эпитаксиальному наращиванию (операция 8). Эпитаксиальный слой с n^- -проводимостью имеет толщину 8...12 мкм



Рис. 1.3. Структурно-технологическая схема изготовления КМДП ИМС и удельное сопротивление $0,1 \dots 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Качество слоя определяется электрофизическими свойствами, а также количеством дефектов и дислокаций, которое не должно превышать 10^4 см^{-2} .

Слой диоксида кремния толщиной $0,5 \dots 1 \text{ мкм}$ (операция 9) создается для маскирования поверхности с тем, чтобы с помощью второй литографии (операция 10) сформировать окна под разделительную диффузию. В планарно-эпитаксиальной технологии электрическое разделение элементов микросхемы проводится с привлечением обратномещенных $p-n$ -переходов.

Требования к качеству выполнения операций фотолитографии, начиная с этой стадии изготовления, дополняются условиями точного совмещения нового рисунка с предыдущим.

Двухстадийная диффузия бора (операция 11) выполняется для формирования разделяющих областей с p -проводимостью. Она проводится при температуре 1100°C — «загонка» и 1200°C — «разгонка» с окислением в атмосфере сухого кислорода.

Формирование базы транзисторов осуществляется последовательно проводимыми операциями: очистка поверхности (операция 12), окисление (операция 13), третья фотолитография (операция 14), диффузия бора (операция 15). В результате выполнения этих операций на глубине $2,5 \dots 3 \text{ мкм}$ создаются области с удельным сопротивлением $150 \dots 300 \text{ Ом}/\square$.

Требования к качеству выполнения операций и режимам обработки аналогичны описанным выше.

При формировании эмиттера производится следующие операции: очистка поверхности (операция 16), окисление (операция 17), четвертая фотолитография (операция 18), диффузия фосфора (операция 19). Результатом этих операций являются области с n^+ -проводимостью на глубине $0,8 \dots 2 \text{ мкм}$ с удельным сопротивлением $5 \dots 20 \text{ Ом}/\square$.

После очистки (операция 20) на поверхность пластины наносится слой металла. чаще всего алюминия (операция 21), толщиной 0,2...0,4 мкм, на котором с помощью пятой фотолитографии создаются контактные площадки и проводники, соединяющие между собой элементы ИМС. Разводка в схемах с большой степенью интеграции проводится в несколько слоев, при этом слои металла разделяются слоями диэлектрика, а необходимую топологию получают методами фотолитографии.

Последней операцией обрабатываемой фазы является контроль готовых структур на пластине (операция 23). После контроля пластина передается в сборочную фазу производства.

Технология МДП-схем. Технология МДП-схем основана на формировании свойств изделий на поверхности полупроводникового или изоляционного материала. Различают три вида схем: *n*-МДП, *p*-МДП-схемы, тип которых определен проводимостью материала под затвором, и КМДП-комплементарные схемы, использующие в качестве элементов приборы обоих типов. Наиболее сложной является технология КМДП-схем, последовательность операций которой приведена на рис. 1.3. Исходным материалом для получения КМДП-приборов служат пластины кремния с *n*-проводимостью диаметром 60...150 мм, толщиной 0,2...0,4 мм с удельным сопротивлением 2,5...10 Ом·см. Из однородных по свойствам пластин формируются партии (операция 1) для последующей совместной обработки.

После очистки (операция 2), оксидирования (операция 3), в процессе которого создается слой толщиной 0,9 мкм в атмосфере сухого и влажного кислорода, и последующей очистки (операция 4), во время которой удаляется слой с нарушенной кристаллической структурой, пластина считается подготовленной к операциям, формирующим отдельные области с *p*-проводимостью — «карманы».

Для получения «кармана» используются следующие операции: оксидирование (операция 5), в результате которого получают слой диоксида кремния толщиной 0,5...0,6 мкм при температуре 1200°С в атмосфере сухого и влажного кислорода; первая фотолитография (операция 6), формирующая окна под изолированные области; диффузия бора (операция 7), которая обеспечивает введение необходимой примеси за две стадии: «загонку» и «разгонку».

В результате этих операций создаются локальные области с удельным сопротивлением 700 Ом/□ на глубине 6 мкм, прикрытые сверху оксидом толщиной 0,5 мкм.

Требования к качеству выполнения операций, соблюдению режимов и к самим режимам для МДП- и планарно-эпитаксиальной технологий сходны.

Следующая группа операций предназначена для формирования областей истока и стока с каналами *p*-проводимости. Она включает в себя: вторую фотолитографию (операция 8), первую стадию диффузии бора — «загонку» (операция 9), снятие боросиликатного стекла (операция 10), очистку (операция 11), вторую стадию диффузии бора (операция 12).

Каналы с *p*-проводимостью имеют удельное сопротивление 90 Ом/□ на глубине 1 мкм.

При формировании канала *n*-проводимости выполняются последовательно следующие операции: третья фотолитография (операция 13), «загонка» фосфора (операция 14), снятие фосфоросиликатного стекла (операция 15), очистка (операция 16). Удельное сопротивление канала составляет 30...40 Ом/□ на глубине 1 мкм.

Слой диэлектрика над затворами формируется с помощью операций: четвертой фотолитографии (операция 17), которая предназначена для получения окон над затворами, наращивания слоя оксида (операция 18) над затвором толщиной 0,1 мкм.

Затем проводят диффузию фосфора (операция 19) и для стабилизации свойств изделия — отжиг при температуре 1000° С в атмосфере сухого азота (операция 20).

В результате всех этих операций образуются транзисторные структуры, в которых удельное сопротивление областей, «исток — сток», соединенных каналами *p*-проводимости, составляет 90...100 Ом/□, а соединенных каналами *n*-проводимости — 12...13 Ом/□, на глубине 2 мкм. Транзисторы сформированы в «карманах», граница которых имеет удельное сопротивление 350 Ом/□ на глубине 7 мкм.

Пятая фотолитография (операция 21) служит для вскрытия окон под контакты, после чего наносится слой алюминия (операция 22) толщиной 0,7...0,8 мкм. Операция 23 проводится для получения межсоединений, топология которых получается методами фотолитографии.

После травления для стабилизации свойств металла проводников проводится термообработка (операция 24), затем готовые структуры поступают на контроль (операция 25).

Получение ИМС по *n*-МДП- и *p*-МДП-технологиям проще, поскольку в них не нужны операции разделения пластины на локальные области (операции 5—7) и используется только одна группа операций, формирующих каналы: либо с 8-й по 12-ую, либо с 13-й по 16-ую. Однако схемные реализации на основе КМДП-приборов более эффективны, что обеспечивает широкое применение КМДП-технологии.

Анализ особенностей технологий и приведенные выше структурно-технологические схемы позволяют выделить и сгруппировать основные операции обрабатываемой фазы. Ими являются: обработка поверхности пластины кремния, оксидов и пленок металла или диэлектрика на ней;

получение топологии ИМС на кремнии, оксидах и металлах; формирование свойств материала в отдельных слоях или локальных областях;

нанесение пленок, слоев из диэлектрика, металла или оксидов.

Эти операции многократно повторяются в процессе получения ИМС и отличаются режимами, применяемыми материалами и реактивами. Общие требования планарной технологии заключаются в высокой точности соблюдения режимов обработки, высокой чистоте всех реактивов, используемых в процессе производства, и соблюдения электронной гигиены.

Такая общность позволяет выделить технологическое оборудование, характерное для процесса изготовления ИМС, и на его примере сформулировать типичные задачи управления, указав пути их решения на основе микропроцессорных (МП)-систем.

1.2. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Специальное электронное машиностроение микроэлектроники служит наглядным примером эффективного развития передовых научно-технических идей и успешного воплощения их в жизнь. Анализируя опыт предприятий отрасли, можно выделить следующие этапы развития машиностроения:

1) разработку оборудования для всех технологических операций;

- 2) создание линий и комплектов оборудования для оснащения опытных и полупромышленных участков;
- 3) создание комплексов оборудования для различных технологий;
- 4) разработку автоматизированных и автоматических поточных линий для отдельных стадий производства или выпуска определенного типа изделий;
- 5) создание гибких автоматизированных производств изделий микроэлектроники.

На каждом из этапов разработки и совершенствования оборудования решались разные проблемы, общим же направлением развития служило обеспечение высокого качества изделий, повышение объема выпуска, снижение трудоемкости и повышение общей экономической эффективности непрерывно обновляемых производств. Эта стратегия машиностроения и обеспечила высокие темпы развития отрасли в целом.

В технологическом оборудовании микроэлектроники используются различные физические явления. Поиски наиболее эффективного их применения для формирования необходимых свойств изделий электронной техники составляли основное содержание работ *первого* этапа. При этом были выделены две ключевые проблемы: организация целенаправленного воздействия на полупроводниковые материалы, обеспечивающего получение необходимых свойств изделий (операции), и создание условий для выполнения этих операций путем формирования рабочего объема с жестко контролируруемыми свойствами среды.

К характеристикам рабочего объема, в котором выполняются технологические операции, относятся: состав среды, определяемый парциальным давлением паров веществ; давление в рабочем объеме; интенсивность и градиент электромагнитного поля, чистота среды, т. е. отсутствие в ней посторонних частиц, атомов, ионов и т. д.

Технологические операции в микроэлектронике характеризуются высокой точностью, должны обеспечивать изменение свойств материалов в локальных областях малых размеров и исключать побочные явления, которые могут возникать в результате обработки.

Для формирования необходимых свойств ИМС используются: механическая обработка, химические реакции, воздействие сфокусированными пучками вещества — электронная и ионная обработка, воздействие электромагнитным полем — низкотемпературной плазмой, обработка сфокусированными пучками энергии — лазерная обработка. Помимо того, что разработка оборудования, использующего столь разнообразные физические явления, нова и сложна сама по себе, необходимо было выбрать или создать такие конструкционные материалы, которые в процессе обработки не вызывали побочные явления, искажающие свойства получаемых изделий.

На качество технологического процесса могут влиять газовыделение из материалов, находящихся в рабочем объеме, реакции материала установки с агрессивными веществами парогазовой или

жидкой фазы, используемыми в химических процессах, возникновение пыли и статистических зарядов на поверхности в результате трения подвижных частей и т. п.

Главным на *втором* этапе — разработка комплексов оборудования — было решение задач совместимости различных процессов и приемов в едином технологическом процессе, охватывающем определенную стадию изготовления ИМС. Центральное место принадлежало здесь установлению преемственности операций, выполняемых при изготовлении, введении при необходимости специальных мер по защите и активации поверхности. Большое внимание при этом было уделено конструктивным решениям, единым с точки зрения эргономики, эстетики, конструктивной и технологической баз оборудования.

Задачи автоматизации, решаемые на этих двух этапах, касались в основном создания систем стабилизации и программного управления отдельными параметрами оборудования. Кроме того, большое внимание уделялось разработке методов и приборов для контроля параметров технологических процессов и качества на каждой стадии изготовления ИМС.

Высокие темпы развития микроэлектроники и непрерывный рост объема выпуска ИМС потребовали существенного сокращения времени на переоснащение производства и повышение его экономической эффективности. Решение этих проблем осуществлялось на *третьем* этапе разработки комплексов оборудования. Комплекс оборудования представляет собой полный набор технологических установок, измерительной аппаратуры и средств управления, обеспечивающий выпуск заданной программы годных изделий. При освоении на производстве состав комплекса уточнялся заказчиком, а вопросы организации и управления комплексом оставались мало разработанными, несмотря на то, что в его составе предусматривались технические средства сбора и переработки информации. Примером такого решения служит комплекс типа «Корунд», оснащенный комплектом технических средств для сбора и переработки информации.

На этом этапе была осознана важность организационного управления производством, построенного на основе комплексов, и установлено, что разработка изделия, технологии его изготовления, оборудования, организации и управления должны рассматриваться как единый процесс.

Необходимость сокращения непосредственных трудовых затрат при изготовлении ИМС потребовала повышения уровня автоматизации. Этому способствовало появление достаточно надежных и сравнительно дешевых мини-ЭВМ. Поэтому *четвертый* этап развития был связан с созданием автоматических и автоматизированных поточных линий. Сложность и динамичность производства микроэлектроники, в которой обновление оборудования практически происходит через каждые 5—6 лет, не позволили создать экономически эффективные автоматизированные производства ИМС на основе традиционных методов, используемых в машиностроении.

Это объясняется тем, что автоматические поточные линии создавались для изделий, характеристики которых достаточно однородны и стабильны, а длительности процессов обработки на отдельных операциях кратны друг другу. Последнее обстоятельство позволило получить сбалансированную по производительности линию. Однако в микроэлектронике из-за большого разнообразия процессов, жестких требований к соблюдению времени межоперационного ожидания такая стратегия оказалась не эффективной.

Поэтому в производстве автоматические и автоматизированные линии применяются лишь для выполнения отдельных процессов: диффузии, очистки, фотолитографии и некоторых других. Они состоят из отдельных типовых модулей, использующих унифицированную конструктивную базу и предназначенных для размещения в линию. Компоновка линий из модулей обеспечивает разделение зон обслуживания на рабочую — чистую зону, оснащенную специальными средствами пылезащиты, и зону обслуживания с более низкими требованиями к электронной гигиене.

В настоящее время (*пятый этап*) проблему создания высокоэффективного производства решают путем проектирования гибких автоматизированных систем (ГПС). В ГПС сочетаются достоинства универсального оборудования: гибкость (способность выполнять достаточно широкий круг операций) и высокая производительность автоматизированного поточного производства. Существенный недостаток традиционного поточного производства, связанный с трудностью переналадки — жесткостью линии, преодолевается за счет совместного использования технологических модулей, транспортных и складских систем, управляемых ЭВМ. Универсальные транспортные системы, оснащенные роботами для погрузки изделий и имеющие свободное адресование, позволяют легко формировать необходимые технологические маршруты обработки при смене изделий. Замена одного модуля другим с той же конструктивной базой несложна.

Примером ГПС служит автоматизированная поточная линия диффузии, в состав которой входят:

- три трехтрубные диффузионные печи, оснащенные загрузчиками;
- газораспределительная система;
- транспортная система, позволяющая адресовать кассеты с пластинами в любой реактор;
- центральный пульт управления линией;
- промышленный робот, обеспечивающий перегрузку кассет из накопителя в транспортную кассету и обратно.

Поточная линия komponуется в виде чистого коридора. Диффузионные печи оснащены системами пылезащиты. Управление линией производится с помощью микроЭВМ.

Полностью автоматизированное и оснащенное встроенными микропроцессорными системами управления оборудование появилось относительно недавно. В установках применяются роботы или специальные механизмы переноса пластин из кассеты в

рабочую камеру и после обработки обратно. Еще недавно считалось, что для переноса пластин с одной операции на другую будут использоваться механические конвейеры или воздушная подушка. В настоящее время широко внедряются такие устройства, как транспортные роботы, чистые тоннели.

Интерес представляет транспортная система, предложенная фирмой Hewlett — Packard. Для хранения и переноса кассет с пластинами используются небольшие герметизированные пыленепроницаемые контейнеры. Каждый контейнер имеет специально сконструированную «дверь». Такая же «дверь» есть и у загрузочной системы технологического оборудования. При передаче кассет обе «двери» открываются одновременно, чем устраняется возможность попадания пыли с «дверей» на пластины. Оборудование оснащено специальным механизмом, который управляет «дверями» и переносит кассету из транспортного контейнера в устройство загрузки оборудования без загрязнения пластин. Эта система получила название «стандартного механического интерфейса». Система достаточно гибкая и позволяет переносить контейнеры с пластинами как с помощью транспортного робота, так и вручную оператором.

Значительная доля потерь в производстве возникает из-за ошибок оператора, который может направить пластину на технологическую установку, не настроенную на необходимый режим. Автоматическая транспортировка пластин от одного участка к другому исключает такие ошибки, а управляемые с помощью ЭВМ технологический процесс и технологическое оборудование дают возможность вышестоящей ЭВМ, управляющей движением партий пластин по необходимому технологическому маршруту, идентифицировать пластину или партию пластин и точно определить параметры рабочего процесса на любой установке.

Однако создание автоматизированного технологического оборудования и средств транспортирования пластин недостаточно для создания комплексной полностью автоматизированной системы управления производством. Важнейшей составляющей частью такого производства является система сбора и обработки информации, включающая аппаратные и программные средства, объединенные сетью связи в единую систему управления. Основными принципами построения такой системы являются:

- безлюдная технология при трехсменной работе;
- групповая технологическая обработка;
- программируемый автоматизированный переход с изделия на изделие;

- замкнутый цикл обработки.

Примером частичной реализации такого подхода является система QTAT — Quick, Turn Around Time (малой длительности цикла) фирмы IBM (США). Основное назначение системы — сократить время разработки и выпуска новых ИМС частного применения. В системе применяется индивидуальный метод обработки пластин — получение разводки на пластинах с транзисторными структурами.

В состав линии QTAT входят восемь гибких производственных систем, выполняющих электронно-лучевую литографию, т. е. нанесение электронного резиста, экспонирование, травление и, наконец, снятие резиста. Нанесение диэлектрических и металлических слоев производится вакуумно-плазменными методами, а для травления используются химические методы и методы ионного травления.

Одна ГПС содержит три установки электронно-лучевого экспонирования. Обработка пластин в пределах ГПС — индивидуальная, транспортирование их производится на воздушной подушке, адреса передачи устанавливаются ЭВМ. Каждая пластина имеет номер, нанесенный лазерным лучом. Номер считывается автоматически при поступлении пластины на обработку.

Транспортная система, с помощью которой передаются пластины между ГПС, имеет накопители длительного хранения. Они обеспечивают бесперебойную работу линии при откатах отдельных единиц оборудования. Хранение пластин производится в герметизированных кассетах по 25 шт. в защитной среде.

Управление производством осуществляется сетью ЭВМ, организованных в виде иерархической системы. На верхнем уровне системы используется ЭВМ IBM S=370, на остальных — IBM S=7, модель 3270. Установки, применяемые в ГПС, оснащены микропроцессорными системами. Обмен информацией с операторами, технологами осуществляется с помощью терминальных устройств. Терминалы позволяют с любого места получать доступ к необходимой информации независимо от того, в памяти какой из машин она хранится. Применение этой системы позволило сократить цикл изготовления схемы по заказу с 30...40 до 10 дней.

Хотя внедрение ГПС в производство ИМС начато не так давно, полученные результаты говорят о высокой их эффективности.

1.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

В формировании элементов ИМС большую роль играют свойства поверхности полупроводникового материала и слоев, наносимых на пластину в различных технологических целях. Обработка поверхности может быть направлена на придание всей поверхности необходимых свойств или изменение свойств в локальной области. Основными операциями, проводимыми на поверхности, являются:

химическое полирование — удаление на всей пластине слоя с нарушенной кристаллической решеткой;

травление — селективное удаление материала слоя или пластины;

очистка — удаление с поверхности материалов после выполнения ими технологических функций и различных загрязнений.

Операции очистки и травления производятся многократно, а технологические процессы отличаются применяемыми веществами и режимами, выбираемыми в зависимости от свойств подложек и удаляемого материала. Так, при травлении существенно отличаются методы, применяемые при обработке поверхности диоксида кремния, металлов и диэлектриков.

Загрязнения, появляющиеся на поверхности пластин, принято делить на две группы:

внешние, определяемые качеством окружающей среды (влажностью воздуха в помещении, запыленностью, наличием паров агрессивных веществ и др.);

внутренние, возникающие как побочные эффекты при выполнении технологических операций. Борьба с этим видом загрязнений особенно сложна.

Для обработки поверхности применяются два метода: химический — «жидкостной» и вакуумно-плазменный — «сухой».

Технология химического метода обработки включает в себя: удаление органических соединений, химически не связанных с пластиной, с помощью специальных растворителей (толуола, изопропилового спирта, аммиака и т. п.);

удаление загрязнений, химически связанных с пластиной, оксидов и других соединений с помощью кислот (плавиковой, соляной или сложными смесями);

механическое удаление частиц с поверхности пластины, как правило, гидромеханическим способом, совмещающим механическое и химическое воздействия, промывку пластин в деионизованной воде, сушку пластин после промывки.

Разнообразие реактивов и режимов обработки, требования высокой чистоты применяемых веществ потребовали разработки оборудования, в котором для каждой операции создается свой рабочий объем — ванна. Материал ванны и активация процесса в ней могут быть различными.

Общими недостатками химического метода обработки являются:

неуниверсальность, приводящая к необходимости использования различных сред для обработки, что требует выбора специальных конструкционных материалов и способов нейтрализации продуктов реакции;

возникновение вредных для изделия реакций на поверхности кремния;

внесение загрязнений.

Кроме того, химическое травление, как правило, изотропно, т. е. при формировании локальных областей удаления пленки проходит с одинаковой скоростью вдоль пленки и по толщине. Это приводит к существенному ограничению линейных размеров элементов ИМС (предельное разрешение около 1 мкм).

Вакуумно-плазменные методы обработки позволяют избежать некоторых указанных недостатков и обладают большим разрешением. «Сухие» методы более универсальны и обеспечивают:

низкий уровень загрязнения поверхности;
хорошую воспроизводимость скорости травления материалов от цикла к циклу;
высокую равномерность травления поверхности;
малый уровень загрязнения окружающей среды;
безопасность работы персонала.

Физико-химический механизм вакуумно-плазменной технологии позволяет выделить следующие типы процессов обработки поверхности.

Ионное травление (ИТ), при котором поверхностные слои материала удаляются в результате физического распыления. Процесс не сопровождается химическими реакциями. Если обрабатываемый материал помещен на электродах или держателях, соприкасающихся с плазмой разряда, то травление называют ионно-плазменным, если же материал отделен от области плазмы — ионно-лучевым.

Плазмохимическое травление (ПХТ) происходит при взаимодействии между поверхностью и химически активными частицами, к которым относятся свободные атомы и радикалы. Если при этом материал находится в области плазмы разряда, то травление называют плазменным, если область реакции отделена от плазмы, то травление — радикальное.

Ионно-химическое (ИХТ), или реактивное ионное травление, характеризуется совместным действием физического распыления и химических реакций. Аналогично предыдущему при материале, находящемся в области плазмы, процесс называют реактивным

Таблица 1.1. Показатели процесса травления

Характеристика процесса травления	ЖХТ	ИТ	ПХТ	ИХТ
Универсальность	Нет	Да	Нет	Да
Разрешающая способность, мкм	$L = L_m + \delta$	$L = L_m$	$L = L_m + (1/2 \dots 1/4)\delta$	$L = L_m$
Селективность травления	10...100	1...10	10...100	5...20
Неравномерность травления в партии пластин, %	1	3...5	1	3...5
Неровность края от полученного размера, %	10...15	3...5	3...5	3...5
Диапазон технологических скоростей травления, нм/с	1...10	0,1...1	1,0...10	0,5...5,0
Совмещение операций травления материала и удаление фоторезиста	Нет	Ограничено	Да	Ограничено
Очистка поверхности после травления	Да	Нет	Нет	Нет
Управление травлением от ЭВМ	Нет	Да	Ограничено	Да

Примечание: L_m — ширина записи, δ — толщина пленки фоторезиста

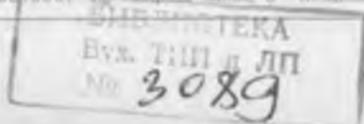


Таблица 1.2. Оборудование химической обработки «Лада-1 Электроника»

Характеристика	Уста			
	химической обработки			
	084ХН-100-001	084ХН-100-002	084ХН-100-055	084ХО-100-003
Одновременная загрузка, шт.	50	50	150	50 реактивы 25 вода
Диаметр пластин, мм	60; 75	60; 75	60; 75	60; 75
Время обработки, с:				
в реагенте	120...3600	120...3600	120...3600	60...90
в воде	120...3600	120...3600	120...3600	120...3600
ультразвуком (сушка)	—	—	—	—
Температура реагента, С	50...120	50...120	50...120	50...120
Погрешность стабилизации температуры, С	±5	±5	±5	±10
Материал ванн	Фторопласт	Фторопласт	Фторопласт	Нержавеющая сталь
Число ванн	3	1	3	1 двухсекционная
Частота вращения центрифуги, мин ⁻¹	—	—	—	—
Потребляемая мощность, кВт	3	1,5	3	2,2
Напряжение питания, В	380,220	380,220	380,220	380,220
Расход, м ³ /ч:				
воды	—	—	—	—
воздуха	0,15	0,15	0,15	0,15
азота	—	—	—	—
Габаритные размеры, мм	1922 × 945 × 2480	1312 × 945 × 2480	1922 × 945 × 2480	1310 × 945 × 2480
Производительность вытяжной вентиляции, м ³ /ч	1500	1000	1500	1000

Примечания: 1. Давление воды и воздуха в магистрали 0,4...0,6 мПа.

2. Давление азота 0,2...0,25 мПа, точка росы — 60 С.

3. Давление остаточных газов в вакуумной системе установки О4ЧШ-75-001 $0,27 \cdot 10^{-3}$ Па.

4. Установка О4ЧШ-75/4-001 имеет четыре независимых трека.

ионно-плазменным, альтернативным процессом является реактивный ионно-лучевой.

Сравнительные характеристики химического «жидкостного» травления (ЖХТ) и вакуумно-плазменных методов приведены в табл. 1.1.

Оборудование вакуумно-плазменной обработки более сложно,

отмывки и сушки	ультразвуковой отмывки	гидромеханической отмывки
08BC-01500-004	08ЧУВ-0008-002	04ЧШ-75-4-001
100∅60; 75 мм 50∅100 мм 60; 75; 100	50∅60; 75 мм 60; 75	Кассета 25 60; 75
—	120...3600	Время регулируется 1...99 при шаге с дискретностью 1 с
50...240	120...3600 60...900	
—	50...120	—
—	± 5	—
—	Фторопласт	—
1 барабан на 4 кассеты	—	0...500
200...1400	—	0...10 000
1,7	2	0,6
380/220	380/220	220(50 Гц)
0,2	0,4	0,05
—	5	0,2...0,3
0,5	—	0,2...0,25
1310 × 945 × 2480	1915 × 945 × 2480	1206 × 807 × 1028
1000	—	50

чем химической, но оно перспективно с точки зрения автоматизации и полнее соответствует требованиям ГПС.

Рассмотрим типичное оборудование, используемое при этих методах.

Оборудование для химической обработки. В производстве массовых ИМС широко применяется комплекс оборудования

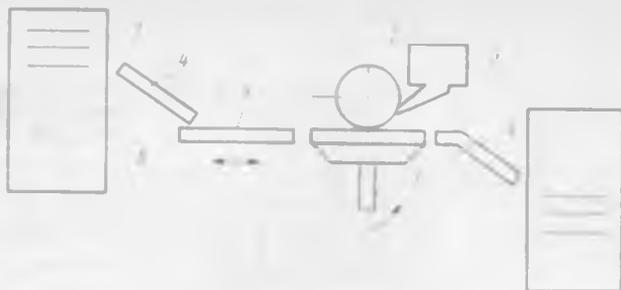


Рис. 1.5. Схема установки гидромеханической отмывки

8 — установка химической обработки 084ХН-100-002.

Различные типы установок химической обработки предназначены для работы с разными веществами. Они используются на различных стадиях технологического процесса. Так, в установках 084ХН-100-001 для травления боро- и фосфоросиликатного стекла применяется плавиковая кислота. Установка 084ХН-100-005 рассчитана на применение плавиковой кислоты, фтористого аммония и других агрессивных сред.

Типовой модуль, представляющий основу установки химической обработки, содержит фторопластовую ванну, в которой производится обработка. Для интенсификации процесса реактивы подогреваются нагревателем. В рабочем пространстве организуется ламинарный поток обеспыленного воздуха, который очищается фильтром и удаляется системой вытяжки. В одном модуле могут размещаться до трех ванн с реактивами и трех ванн для отмывки в деионизованной воде, из которых одна — каскадная.

Различие в установках связано с применяемыми реактивами и способами активации процесса. Кроме подогрева могут применяться разные способы перемешивания или воздействие ультразвуком.

Пластины при обработке помещаются в специальные кассеты: фторопластовые для химической обработки и металлические из сплавов алюминия для гидромеханической отмывки. Наличие кассет позволяет реализовать принцип работы из «кассеты в кассету», при котором оператор не соприкасается с пластинами. Транспортировка кассет из ванны в ванну производится специальными механизмами, управляемыми от программного устройства, которое может быть связано с ЭВМ.

Принцип работы установки гидромеханической отмывки (рис. 1.5) предусматривает начало работы после того, как пластина подана на стол центрифуги 1 и закреплена там вакуумным присосом. Частота вращения центрифуги регулируется в пределах 200...1400 мин⁻¹. Механические загрязнения удаляются с помощью щетки 2, под которую из питателя 3 подается моющий раствор. Сушка пластины проводится на центрифуге при максимальной частоте вращения и поднятой щетке 2.

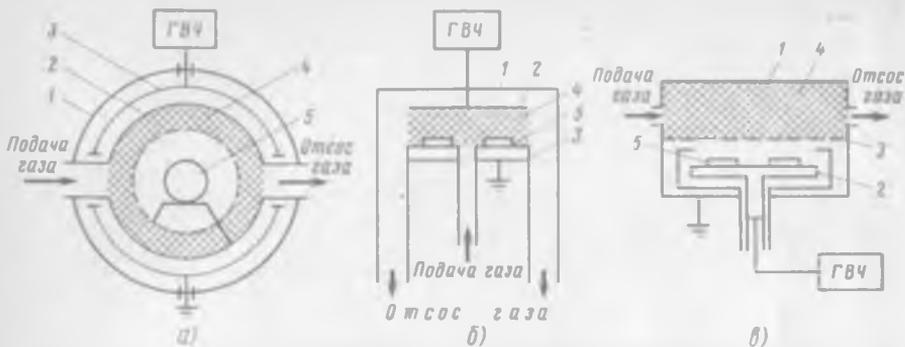


Рис. 1.6. Схемы реакторов вакуумно-плазменного травления:

а — цилиндрический для плазмохимического радикального травления, *б* — планарный для ионно-химического плазменного травления; *в* — планарный для ионно-химического реактивного лучевого травления

Подача пластин производится механизмом, состоящим из слипов 4 и транспортера 5, совершающего возвратно-поступательное движение. Пластины 7 помещены в транспортные кассеты 6.

Рабочий цикл установки автоматизирован с помощью специального программатора, который позволяет устанавливать время выполнения операций с дискретностью 1 с в диапазоне 0...99 с. Кроме того, он управляет сменой моющих веществ, частотой вращения centrifуги, транспортированием пластин.

Типичным для установок химической обработки является наличие в их составе:

ванн для процессов обработки и отмывки пластин в деионизованной воде;

механизмов подачи и удаления реактивов из рабочего объема;

механизмов перегрузки и транспортирования пластин;

средств для активации процессов;

устройств для сушки пластин после отмывки.

Условия нормальной эксплуатации химического оборудования должны предусматривать:

мероприятия и технические средства, защищающие оператора от воздействия испарений агрессивных сред;

систему нейтрализации продуктов реакции;

систему для подготовки реагентов;

защиту очищенных пластин от попадания пыли и других загрязнений.

Оборудование вакуумно-плазменной обработки. Конструкция оборудования для вакуумно-плазменного травления определяется назначением процесса и свойствами материала, подлежащего обработке. Например, при травлении важным показателем является анизотропность, оцениваемая отношением толщины удаляемого слоя к величине бокового подтравливания, что определяет

Таблица 1.3. Характеристика режимов вакуумно-плазменного травления

Наименование параметров	Вид травления					
	ИТ		ИХТ		ПХТ	
	плазменное	лучевое	реактивное плазменное	реактивное лучевое	плазменное	радикальное
Скорость травления, мм/с	0,1...1	0,3...3	1...5	0,3...3	2...10	1...3
Анизотропность	5...10	$10^{-1} \dots 10^2$	5...30	$10^{-1} \dots 10^2$	2...5	2...5
Разрешающая способность травления, мкм	0,5...0,7	0,3...0,5	0,4...0,6	0,3...0,5	0,7...1	0,7...1
Селективность травления	2...5	2...5	5...10	5...10	10...30	20...50
Равномерность травления на диаметре 100 мм, %	90...95	95...97	90...95	95...97	80...90	90...95
Давление рабочего газа, Па	$1 \dots 10^6$ $0,1 \dots 1^{**}$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$	$1 \dots 5^*$ $0,1 \dots 1^{**}$	$10^{-2} \dots 0,5$	$50 \dots 10^3$ $10 \dots 10^2$ 0,1...1	$50 \dots 10^3$ $10 \dots 10^2$
Расход газа, см ³ /мин	20...5	1...10	20...50	1...20	$50 \dots 10^2$	$50 \dots 10^2$
Температура подложки, С	200...400	150...300	150...250	100...200	150...200	100...200

* Диодное
** Многоэлектродное

искажения ширины линий. При очистке главное внимание уделяется селективности, т. е. способности удалить материал, например фоторезист или окисел, не затрагивая основной материал.

Сопоставление разных методов травления приведено в табл. 1.3.

Основным элементом, определяющим особенности построения установки, является рабочая камера, или реактор (рис. 1.6).

Цилиндрический реактор (рис. 1.6, а) состоит из камеры 1, в которой размещены полукольца электродов, катода 2, подсоединенного к генератору высокой частоты (ГВЧ), и анода 3, имеющего потенциал земли.

Плазма с химически активными частицами (радикалами) образуется в кольцевой зоне, ограниченной электродами и сеткой — перфорированным цилиндром 4 (заштрихованная область). Пластины 5 помещаются в кассете в центральной части реактора. Рабочий газ подается в зону плазмы, а продукты реакции удаляются с помощью вакуумной системы. Процесс очистки (травления) в реакторе обеспечивается за счет химических реакций и определяется свойствами соединений, которые необходимо удалить с поверхности пластин, и видом радикалов.

Такие реакторы относятся к объемному типу. Недостатками их являются неодинаковые условия, в которых находятся пластины (взаимное экранирование пластин), и требование достаточно большой продолжительности времени жизни радикалов. Они должны достигнуть поверхности пластин прежде, чем вступят в реакцию.

Планарные реакторы (рис. 1.6, б, в) обеспечивают более равно-

мерную обработку поверхности. При ионно-химическом травлении возможно травление в плазме, когда кроме химического воздействия в зависимости от разности потенциалов между катодом 2 и анодом 3 осуществляется и физическое распыление. Обозначения 1, 4, 5 на рис. 1.6, б, в те же, что и на рис. 1.6, а.

Лучевое ионно-химическое травление (рис. 1.6, в) рекомендуется применять в тех случаях, когда нужно свести к минимуму боковое подтравливание. Улучшение этого показателя достигается регулированием угла падения ионов на поверхность подложки. Равномерность обработки всех подложек достигается вращением столика с подложками.

Примером установки для плазмохимической обработки служит 08ПХО-100/10-006, предназначенная для травления диоксида и нитрида кремния, а также слоев алюминия на чистом кремнии и оксида.

В состав установки входят: агрегат плазмохимической обработки, блок подготовки технологических газов, блок подготовки воздуха, вакуумная система из двух механических насосов и азотной ловушки, шкаф управления, содержащий источники питания и устройства локального управления, пост управления типа ПУ-25 (Орион-2), содержащий микроЭВМ «Электроника», дисплей и устройства связи с объектом.

Установка имеет планарный реактор с откачкой через центр электрода. Расстояние между электродами может регулироваться при обработке технологического процесса в пределах 15...40 мм.

Технические характеристики установки

Одновременная загрузка, пластин	10 (диаметром 100 мм)
Непрерывная работа, ч	16
Рабочее давление, Па	10^{-3}
Минимальное давление, Па	$6,7 \cdot 10^{-5}$
Время откачки до минимального давления, мин	3
Температура термостата, С	50...100
Температура испарителя, С	40
Стабильность температуры, %	± 5
Потребляемая мощность, кв·А	16
Мощность ГВЧ, кВт	0,5...3

Характеристики газовой системы

Газ	Расход, м ³ /с	Избыточное давление, 10 ⁵ Па
Азот	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,5...5
Технологические газы	$1 \cdot 10^{-5}$	0,5...1
Воздух	$1,5 \cdot 10^{-5}$	4...6

Доля метода
литографии

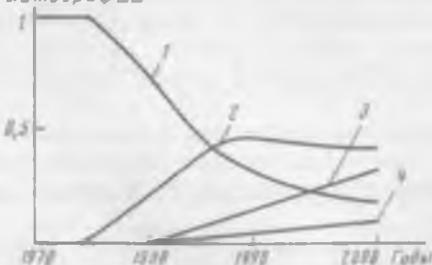


Рис. 1.7. Тенденции распространения методов литографии:

1 — контактная фотопечать; 2 — проекционная фотопечать; 3 — генерирование изображения в ультрафиолетовой области излучения; 4 — электронно-лучевое генерирование изображений

Для эксплуатации установки необходимо подключение ее к системам вентиляции и канализации. Расход воды на охлаждение составляет $10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ при температуре 20 С и давлении в магистрали $(2...4) \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Управление установкой имеет иерархическую структуру: нижний уровень — локальные системы стабилизации; верхний уровень — управление режимами запуска и остановки; выполнение

Таблица 1.4. Характеристики различных способов экспонирования

Способ экспонирования	Длина волны, нм	Предельное разрешение, мкм	Достигнутый уровень				
			Разрешение, мкм	Размер поля, см ²	Время экспонирования, с		
					Модуль	Пластина	
Контактная фотопечать	310	0,3	0,5	90	—	5	
Проекционная фотопечать:	с мультипликацией в видимом свете	436	0,6	1,0	1	—	
	в ультрафиолетовом излучении	200...200	0,25	0,6	1	—	
Электронно-лучевой:	векторное сканирование	—	0,1	0,3	0,04	—	$4 \cdot 10^3$
	растровое сканирование	0,02...0,5	0,5	1,0	0,05	—	10^3
	изменение форм луча	—	0,2	0,4	0,04	—	300
	проекционное 1 × 1	—	0,5	1,0	80	—	50
Рентгеновский:	проекционное с уменьшением	—	0,1	0,4	0,3	—	500
	точечный источник	0,8...4,4	0,3	1,0	80	—	200
	плазменный источник	0,8	0,3	1,0	0,1	—	200
синхронное излучение	0,1...10	0,1	0,3	10	1,0	—	
Ионно-лучевой:	растровое сканирование	0,01...0,1	0,05	0,5	0,01	0,1	—
	проекционное с уменьшением	0,05...0,1	0,05	1,0	1,0	1,5	—

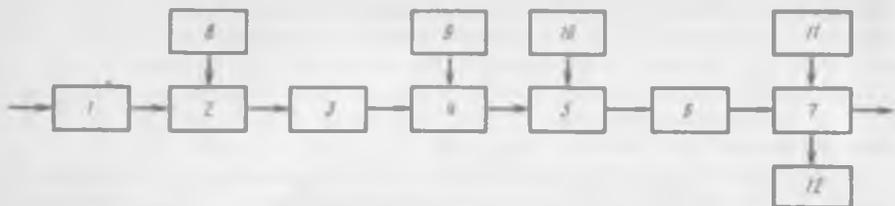


Рис. 1.8. Технологический процесс фотолитографии:

1 — очистка пластины; 2 — нанесение фоторезиста; 3 — сушка; 4 — совмещение и экспонирование; 5 — проявление; 6 — сушка и задубливание; 7 — травление; 8 — подача фоторезиста; 9 — комплект фотошаблонов; 10 — подача проявителя; 11 — подача травителя; 12 — удаление фоторезиста

программы обработки микропроцессорной системы управления. Микропроцессорная система содержит программы диагностики исправности оборудования и самодиагностики.

1.4. ЛИТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Важное место в планарной технологии занимают операции литографии, предназначенные для получения топологии ИМС, т. е. изображений элементов, их размещения и изготовления электрических соединений между элементами на заключительной стадии.

Формирование топологии осуществляется либо с помощью масок, либо непосредственно лучом на поверхности защитной пленки — резиста. Главная роль в процессах литографии принадлежит операции экспонирования, поскольку именно она создает рисунок на пленке резиста, который затем химическими или вакуумно-плазменными методами переносится на пластину. Характеристики различных способов экспонирования приведены в табл. 1.4.

Выбор способа экспонирования определяется разрешающей способностью и экономическими показателями — производительностью и стоимостью технологического оборудования.

Сравнительный анализ методов (рис. 1.7) показывает, что в ближайшие годы наибольшее распространение еще будут иметь методы фотопечати и фотолитографии. Причем преимущество будет принадлежать проекционной печати.

Структура процессов различных методов литографии сходна, поэтому остановимся подробнее на особенностях технологии фотолитографии.

Фотолитография. Процесс фотолитографии (рис. 1.8) включает стадии:

- формирование пленки фоторезиста (операции 1—3);
- получение изображения на фоторезисте (операции 4—6);
- перенос изображения на оксид или металл (операция 7).

Операции 8—12 обеспечивают выполнение технологического процесса на соответствующих стадиях.

Для операций очистки поверхности (операция 1) и травления

(операция 7) используются как химические, так и вакуумно-плазменные методы, рассмотренные ранее. К оборудованию для нанесения пленки фоторезиста (операция 2) предъявляются следующие требования:

нанесенная пленка не должна иметь дефектов (проколов, вкраплений, разрывов и т. п.);

толщина пленки должна быть воспроизводимой от процесса к процессу и равномерной по площади пластины;

пленка должна иметь хорошую адгезию к поверхности пластины.

Для нанесения пленки фоторезистов используются центрифугирование, распыление, окунание, накатка. Наибольшее распространение в настоящее время получило оборудование для центрифугирования. В нем пленка формируется под действием центробежных сил, растягивающих каплю фоторезиста на поверхности быстро-вращающейся пластины. Неравномерность толщины пленки при этом не превышает $\pm 10\%$.

В состав установок обычно входят: центрифуга, на которой могут размещаться одновременно от одной до десяти пластин; механизм крепления пластин (обычно вакуумный присос); форсунка для дозированной подачи фоторезиста; устройства для загрузки и выгрузки пластин.

Получение качественной пленки возможно только в условиях высокой очистки среды (нулевой или первый класс электронной гигиены). Допускается не более 1...4 пылинок диаметром 0,5 мкм и более в литре воздуха. Нанесение производится в неактивном свете, длина волны которого зависит от типа фоторезиста.

Процесс сушки (операция 3) определяет такие важные показатели пленки, как адгезия, наличие внутренних напряжений, которые могут приводить к появлению трещин, и стойкость к кислотам.

В оборудовании для сушки используются методы нагрева в ИК- и СВЧ-диапазонах. Нагрев производится в печи в среде инертного газа (обычно осушенного азота). Температура в рабочей камере стабилизируется с погрешностью ± 5 С.

Большое внимание при конструировании печей и выборе режима сушки уделяется скорости испарения растворителя из пленки и удалению паров из рабочего пространства. Это объясняется тем, что в процессе сушки могут образовываться проколы при прохождении пузырьков газа через пленку. Для уменьшения разрывов и проколов сушка проводится в две стадии: сначала при комнатной температуре, а затем при нагреве до 100...140 С.

Повышение качества пленки достигается применением термокомпрессионной сушки, которая осуществляется при давлении (5...7)·10⁵ Па. В этом случае сушка проводится в одну стадию при температуре 200 С; полученная пленка хорошо обрабатывается в

холодных растворителях.

В состав установок для сушки входят: рабочая камера с источниками ИК- или СВЧ-нагрева, стол для размещения пластин, источники питания нагревателя, газовая система. Установки для сушки должны помещаться в вытяжные шкафы, поскольку при сушке испаряются вредные вещества.

Формирование топологии на фоторезистивной пленке осуществляется путем облучения через маску-фотошаблон (операция 4). Для последовательно получаемых изображений (см. рис. 1.2, 1.3) используются разные шаблоны, которые изготавливаются в виде комплекта. Изображения должны быть совмещены друг с другом с высокой точностью.

В производстве используются установки для контактной и проекционной печати. В состав установок обычно входят: устройства совмещения автоматические или ручные, механизм фиксации пластины и фотошаблона, оптическая система, координатный стол, осветитель, устройства загрузки и выгрузки пластин. Установки совмещения и экспонирования эксплуатируются в помещениях нулевого или первого класса электронной гигиены.

Примером современных отечественных установок совмещения и экспонирования служит ЭМ-5006. Она содержит: устройство совмещения, транспортирования и предварительной ориентации пластины, которое обеспечивает автоматическое совмещение пластины и фотошаблона и образование рабочего зазора необходимой величины; устройство экспонирования и контроля совмещения, использующее в алгоритме функционирования реперы, нанесенные на пластине; блок управления, который содержит источники электропитания устройств и механизмов, обеспечивающих работу в автоматическом и ручном режимах.

Технические данные установки

Диаметр пластин, мм	76, 100, 125, 150
Минимальные линейные размеры элементов изображения, мкм	
при контактном экспонировании	2
при экспонировании с зазором	4
Погрешность совмещения, мкм	$\pm 0,5$
Производительность	
при времени экспонирования 5 с	
без учета времени совмещения, пл./ч	200
Размеры фотошаблонов, мм	102 × 102; 127 × 127 153 × 153; 178 × 178
Источник облучения	ртутная лампа высокого давления
Неравномерность освещения рабочего поля, %	
Ø 120 мм	6

Ø 140...160 мм	8
Светочувствительный диапазон фоторезистов, нм	300...450
Напряжение питания при частоте 50 Гц, В	220/380
Потребляемая мощность, кВт	1
Габаритные размеры, мм	1190 × 1020 × × 1580
Масса, кг	400

Задача проявления (операция 5) — сформировать на пленке фоторезиста защитную маску с нужной топологией. Рисунок получают обработкой облученных зон реактивами. При использовании позитивных фоторезистов пленка после химической обработки разрушается, а у негативных фоторезистов — полимеризуется.

При проявлении пластина последовательно обрабатывается несколькими реактивами, выявляющими рисунок, фиксирующими свойства материала и растворяющими необлученную область (негативный процесс) или области, подвергнутые облучению (позитивный процесс). Операция заканчивается промывкой.

В установках для проявления проявитель на пластину подается методами полива, распыления, окунания.

Повышение требований к качеству процессов фотолитографии, увеличение объемов выпуска ИМС, а также необходимость исключения человека из непосредственного участия в технологическом процессе привели к созданию автоматических и автоматизированных линий фотолитографии. Общими принципами построения таких линий являются: индивидуальная обработка пластин методом «из кассеты в кассету», исключая участие оператора в перегрузке пластин; автоматическая транспортировка пластин либо на воздушной подушке, либо с помощью транспортера в специальных спутниках; автоматическая установка пластин в рабочую позицию и обратная передача на транспортер; управление операциями с помощью микропроцессорных систем, связанных с ЭВМ более высокого уровня, откуда поступают программы обработки пластин. Транспортная система таких линий представляет закрытый канал, защищенный от проникновения пыли, актиничного освещения. Движущиеся механизмы транспортной системы не должны при трении частей создавать пыль и электростатические заряды.

Примерами автоматизированных линий являются Glass-1000 фирмы Macronetics и отечественная «Лада-1 Электроника».

Электронно-лучевая литография. Применение электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) позволяет повысить степень интеграции за счет более высокой разрешающей способности и улучшить экономические показатели благодаря повышению выхода годных и сокращению затрат на изготовление шаблонов.

В производстве изделий микроэлектроники ЭЛЛ используется для получения фотошаблонов, СВЧ- и ПЗС-приборов (приборы с зарядовой смесью), приборов на поверхностно-акустических вол-

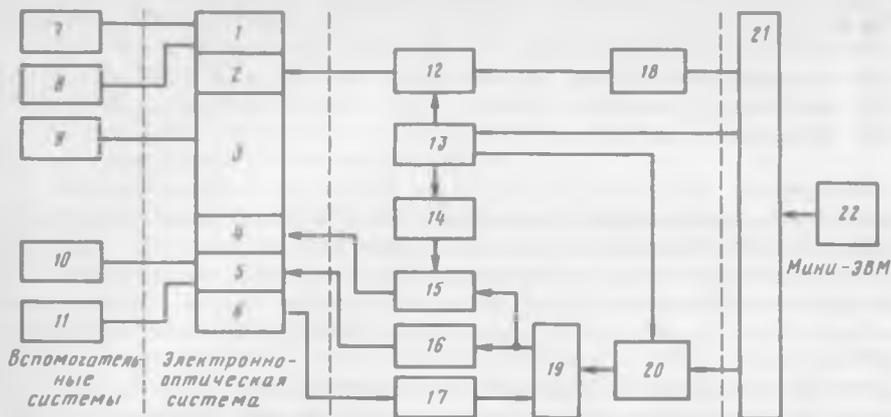


Рис. 1.9. Схема установки EBES

нах (ПАВ) и запоминающих устройств на цилиндрических магнитных доменах.

Технология ЭЛЛ сводится к созданию маскирующего рельефа на подложке и экспонированию электронным лучом, при этом применяются как негативные, так и позитивные (электронные) резисты. Удаление резиста после облучения производится, как правило, вакуумно-плазменным методом.

Для формирования рисунка применяются следующие методы (см. табл. 1.4):

векторное сканирование, при котором остросфокусированный луч перемещается только по формируемым топологическим фигурам;

растровое сканирование, при котором луч проходит всю площадь пластины, включаясь только на тех участках, которые должны быть экспонированы;

экспонирование изменяющейся формой луча, которое предусматривает одновременное облучение определенного кадра (элемента топологии).

Последний метод обладает наибольшей производительностью, но разработка оборудования для его реализации сопряжена со значительными трудностями при создании электронно-оптической системы.

Примером установки с векторным сканированием, используемой для получения ИМС и фотошаблонов, служит EBES. Она позволяет получать элементы размером 1...5 мкм на пластинах диаметром 75 мм.

Схема установки (рис. 1.9) включает в себя электронно-оптическую систему, состоящую из электронной пушки 1, устройства бланкирования (отключения) луча 2, систем фокусировки 3 и отклонения 4, рабочего стола 5 с датчиком положения 6. В состав вспомогательных систем уста-

новки входят: источник питания 7 для подачи ускоряющего напряжения, вакуумные системы для откачки электронной пушки 8, фокусирующая система 9, рабочая камера и шлюз загрузочный 11. Загрузка и выгрузка пластин выполняется автоматически устройством 10.

Система управления установки содержит подсистемы:

бланкирования луча 12, данные о моментах отклонения хранятся в запоминающем устройстве (ЗУ) 18 и обновляются по мере необходимости;

отклонения луча по двум координатам с помощью усилителя 15, генератора развертки 14;

управления движением стола, в котором принимают участие устройство управления приводом 16, интерференционный датчик положения стола 17, устройство сравнения 19.

Информация о необходимых операциях формируется в виде отдельных кадров, которые хранятся в устройстве 20. Согласованное действие системы управления обеспечивается устройством синхронизации и сканирования 13, работа последнего инициируется мини-ЭВМ. Мини-ЭВМ 22 и интерфейс 21 обеспечивают формирование программ обработки, контроль и диагностику всей системы.

Изображение на пластине формируется в виде отдельных кадров. Эти кадры представлены в ЭВМ в виде массива и отображают полосу шириной 256 мкм. Расстояние между центрами отдельных элементов в этой полосе составляет 0,5 мкм. Объем ЗУ (18) позволяет хранить данные об одной полосе. Ориентация пластины при обработке и проверка взаимного расположения полос проводятся по рельефам, размещенным на пластине. Погрешность совмещения при этом достигает 0,2 мкм.

Рабочая частота устройств сканирования 20 МГц и скорость стола 20 мм/с позволяют экспонировать со скоростью до 200 мм²/мин. Экспонирование проходит при одновременном движении стола и луча.

В электронно-лучевой пушке используется вольфрамовый катод с ториевым покрытием, имеющий большой срок службы. Ускоряющее напряжение при обработке пластин 20 кВ, ток луча 40 нА. Фокусирующая система обеспечивает получение пятна с диаметром 0,5 мкм. Отклоняющая система снабжена магнитными линзами, которые обеспечивают прямой (рабочий) ход за 30 мкс, обратный — за 4 мкс. Рабочий ход позволяет получить 512 элементов разложения рисунка.

Координатный стол движется на воздушной подушке, что обеспечивает минимальную вибрацию и высокую точность его перемещения: амплитуда отклонения в плоскости не превышает ± 2 мкм.

Загрузочный шлюз отделен от рабочей камеры вакуумной

заслонкой, управляемой автоматически. Вакуумные системы установки поддерживают давление в камере с пластинами 10^{-4} Па, в фокусирующей системе — 10^{-5} Па и в электронно-лучевой пушке — 10^{-6} Па. Для получения высокого давления используется диффузионный насос с азотной ловушкой, а в фокусирующей системе и электронно-лучевой пушке, кроме того, ионные насосы.

Производительность установки зависит от сложности топологии. Число дефектов составляет $0,2 \text{ см}^{-2}$, что на порядок выше, чем при фотопечати.

1.5. ФИЗИКО-ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Базу и эмиттер транзистора, а также диффузионные сопровивления получают путем дозированного введения примесей в кремний.

Операции литографии определяют размеры и конфигурацию областей — окон на поверхности маскирующего слоя окиси кремния, а формирование объема с необходимым типом проводимости осуществляется с помощью термической диффузии или ионной имплантации. Эти операции должны обеспечивать строгое соблюдение количества и распределения примесей в материале подложки (пластины). Последнее требование обычно связано с глубиной залегания примесей и областью распространения примесей за пределы окна.

Поскольку объективный контроль процесса внедрения примеси невозможен, особое внимание при разработке оборудования и систем управления уделяется обеспечению оптимальных технологических режимов. Выборочный контроль результатов процесса позволяет определять его эффективность путем оценки выхода годных на операции.

Термическая диффузия. Существуют многочисленные методы термической диффузии, из которых наиболее распространенными являются метод «запаянной ампулы», диффузия в вакууме, метод «открытой трубы». Общими для всех методов являются: создание источника примеси на полупроводнике или вблизи его поверхности; нагрев полупроводника до температур, обеспечивающих приемлемую для производства скорость диффузии; прекращение процесса, когда по расчетам границы легированной области соответствуют заданным.

При изготовлении биполярных и МДП-схем наибольшее распространение получил в настоящее время метод «открытой трубы». Диффузия при этом выполняется в две стадии. На первой — «загонке» — диффузант переносится инертным газом к пластинам и насыщает через открытые окна поверхностный слой. Концентрация примесей обычно определяется предельной раство-

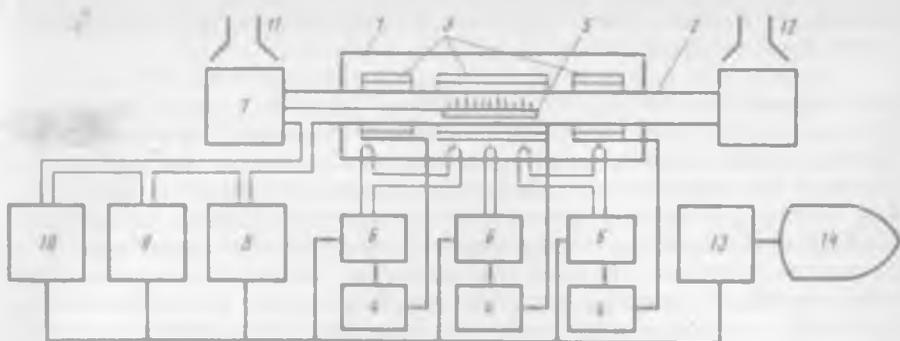


Рис. 1.10. Схема диффузионной системы

римостью примеси (бора или фосфора) в кремнии. Вторая стадия — «разгонка» — проводится с целью получения заданного профиля залегания примеси в полупроводнике. На этой стадии под действием температуры диффузия происходит в глубь материала. Для выравнивания концентрации наружный слой обедняют путем выращивания на поверхности оксида, в который переходит часть примеси.

Для выполнения диффузии применяются диффузионные системы (рис. 1.10), в состав которых входят: печь резистивного нагрева, система подачи газов, система управления тепловым режимом, система загрузки и выгрузки, устройства пылезащиты и вытяжки.

Диффузионная печь представляет собой цилиндрическую камеру 1, футерованную огнеупорным материалом, в которой размещен кварцевый реактор 2. Вокруг реактора располагаются три секции нагревателя 3. Питание их независимо, а нагрев обеспечивается усилителями мощности 4. В реактор помещают лодочку с пластинами 5. Стабилизация температурного режима печи обеспечивается прецизионными регуляторами 6. Измерение температуры производится высококачественными термопарами. Регулирование в торцевых зонах проводится с целью выравнивания температуры по длине печи, для чего термопары торцевых зон включаются по дифференциальной схеме с термопарами, размещенными в средней зоне.

Лодочка с пластинами помещается в печь устройством загрузки 7, которое обеспечивает перемещение ее по программе и возвратно-поступательное движение во время процесса. Последнее предотвращает спекание лодочки с кварцевым реактором.

В газовую систему входят независимые каналы подачи кислорода 8, диффузанта 9 и нейтрального газа 10. Для защиты пластин перед загрузкой в печь имеется система пылезащиты 11, а для эвакуации продуктов реакций — вытяжка 12. Для управления

режимами используется ЭВМ 13, а для обмена информацией с оператором — дисплей 14.

Сложность задач управления процессом диффузии обусловлена необходимостью поддержания температуры с высокой точностью (погрешность $\pm 0,5 \dots 0,25$ С), высоким уровнем температур и требованиями к постоянству состава смеси «газ-носитель — диффузانت». В газовом потоке недопустимы посторонние примеси, поэтому к конструкционным материалам предъявляются особые требования. Поскольку при термической диффузии можно контролировать только условия выполнения процесса, а качество выполнения операции объективно не измеряется, то стабильность условий, в которых идет диффузия, должна быть очень высокой.

В качестве примера приведем технические данные диффузионной системы.

Число реакторов, шт	3
Диаметр пластин, мм	100
Рабочий ход загрузчика, мм	1875
Скорость перемещения лодочки, м/с	$1,66 \cdot 10^{-3}$ 10^{-2}
Регулирование скорости	плавное
Длина рабочей зоны, мм	600
Диапазон рабочих температур, С	700...1250
Погрешность распределения температуры по длине зоны, С	$\pm 0,5$
Погрешность регулирования температуры, С	$\pm 0,25$
Время разогрева печи, ч	2
Рабочие газы	N_2O_2 , HCl
Диффузанты	BBr ₃ , PCl ₃
Погрешность расхода газов, %	$\pm 1,5$
Погрешность расхода диффузантов, %	$\pm 0,5$
Напряжение питания, В	380/220 (50 Гц)
Потребляемая мощность, кВт А:	
при разогреве	100
в рабочем режиме	50
Габаритные размеры, мм	905 × 550 × 2650
Масса, кг	3345

Для эксплуатации системы необходима локальная вытяжная вентиляция с производительностью 950 м³/ч.

Ионная имплантация. Метод ионной имплантации обеспечивает непосредственное внедрение атомов примеси в кристаллическую решетку в месте падения луча, содержащего ионы диффузанта. Это позволяет строить технологический процесс без многократного окисления, т. е. уменьшает число операций, проводимых при высокой температуре. Дозирование энергии частиц в луче позволяет получать области субмикронных размеров с заданной проводимостью.

Границы областей определяются в этом случае соударениями ионов луча с атомами кристаллической решетки и формой луча.

Недостатком метода являются радиационные повреждения решетки. Для уменьшения этого дефекта необходимо строгое соблюдение дозировки энергии частиц в луче, что трудно обеспечить из-за стохастических свойств распределения энергии частиц по сечению луча.

Принципы построения и структура установок для ионной имплантации сходны с установками для электронно-лучевой литографии (см. рис. 1.9). Различия заключаются в формировании пучка и выборе его энергии.

В отечественной промышленности применяются установки типа «Везувий». Для массового производства МДП СБИС с размерами элементов от 3 до 5 мкм разработана установка «Везувий-7М». В установке для получения пучка используется последовательное ускорение с сепарацией ионов по количеству энергии, что обеспечивает однородность пучка. Источником электронов является прямонакальный катод, имеющий большой срок службы.

Технические данные установки

Диаметр обрабатываемых пластин, мм	76; 100; 125
Плотность тока ионов, ион/см ² ·с	3·10 ³
Максимальный ток ионного пучка при энергии 10 кэВ, мкА:	
для В ⁺	300
для Р ⁺	500
для А ₁ ⁺	300
Однородность имплантации, %	99
Энергия имплантации, кэВ	20...100
Частота электростатического сканирования, Гц:	
по координате X	30
по координате Y	2500
Производительность для пластин Ø 76 мм, пл/ч:	
при дозе пучка 6,25·10 ¹² см ⁻²	240
при дозе пучка 6,25·10 ¹⁴ см ⁻²	100
Потребляемая мощность, кВА	10
Габаритные размеры, мм	1570 × 5000 × 2100
Масса, кг	3900

В установке предусмотрено управление вакуумной системой, состоящей из механического и диффузионного насосов, снабженных азотной ловушкой, шлюзовой камерой с независимой откачкой и электронно-оптической системой.

1.6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ СЛОЕВ

При изготовлении ИМС тонкий слой материалов используется как в качестве элементов транзисторов и схем, так и в технологических целях. К первому направлению относятся выращивание эпитаксиальных слоев, получение металлических слоев для разводки и контактных площадок схем, защита схем от внешних воздействий (пассивация). Второе направление связано с получением маскирующих слоев для операций литографии и диффузии. Эти слои после выполнения операции частично или полностью уничтожаются — стравливаются. Оборудование, применяемое для этого, было описано ранее.

Различное назначение слоев, разнообразие применяемых материалов определяют различные требования к технологическим процессам и оборудованию. Общими требованиями, предъявляемыми к слоям, являются: однородность и повторяемость свойств слоев; отсутствие в слоях локальных нарушений, проколов и других дефектов; высокая адгезия слоев и четкость границ слоев, отличающихся физическими свойствами.

Эпитаксиальные слои. Эпитаксиальный слой выращивают на поверхности кремниевой пластины с целью получения на ней двух видов проводимости. Обычно на низкоомной подложке с удельным сопротивлением 0,01...0,001 Ом·см выращивается слой толщиной 10...20 мкм и сопротивлением примерно 1...5 Ом·см.

При получении эпитаксиального слоя используются прямые методы, основанные на перемещении вещества от источника к подложке без химических реакций, и косвенные, при которых на поверхности подложки происходит реакция с осаждением материала. Наибольшее распространение получил хлоридный метод, выполняемый по схеме „открытой трубы“ (рис. 1.11).

Установка состоит из кварцевого реактора 1, вокруг которого расположен нагреватель 2. При эпитаксиальном наращивании используются источники либо ВЧ-, либо ИК-нагрева.

В установках с ВЧ-нагревом подложки 3 помещают на графитовый пьедестал 4. Газовая система содержит независимые каналы подачи: азота 5 для продувки системы, водорода 6, основного транспортного газа — силана 7, источника атомов кремния — диффузанта 8, обеспечивающего необходимое легирование выращиваемого слоя.

Необходимая концентрация вещества в зоне реакции обеспечивается прецизионным регулированием расхода газов. Для создания вакуума в системе имеется форвакуумный насос 9. Продукты реакции нейтрализуются в скруббере 10. Управляемый источник питания 11 обеспечивает подвод необходимой мощности. Управление режимами работы осуществляет микропроцессорная система 12.

Примером установки эпитаксиального наращивания с ИК-на-

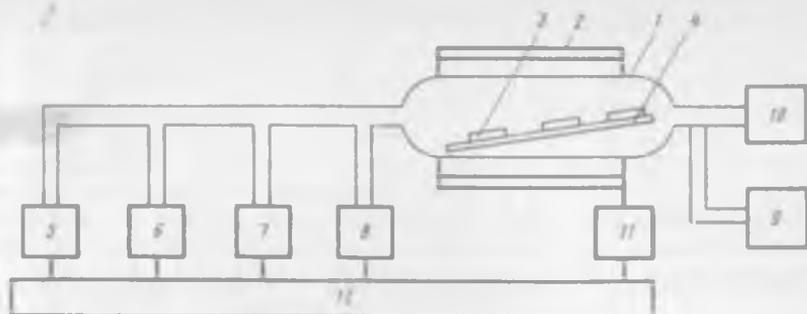


Рис. 1.11. Схема установки эпитаксиального наращивания гревом является УНЭС типа 02ЭИК-100-003, предназначенная для получения слоев на основе реакции



В состав установки входят:

агрегат нанесения, состоящий из вертикального кварцевого реактора, графитового пьедестала с приводом, обеспечивающим его вращение, подъем и опускание;

шкаф газораспределения с источниками необходимых материалов и системами стабилизации расходов;

шкаф питания;

блок пылезащиты;

пульт управления, содержащий микроЭВМ, устройство связи с объектом и дисплей.

Технические данные установки

Число реакторов	1
Число одновременно загружаемых пластин:	
∅ 76 мм	30
∅ 100 мм	14
∅ 125 мм	12
Рабочая температура, °С	1000...1250
Тип нагрева	инфракрасный
Неоднородность температурного поля, °С	±10
Погрешность регулирования температуры, °С	±2
Воспроизводимость температуры от процесса к процессу, °С	±3
Давление в рабочей камере, Па	(0,5...0,6)·10 ⁵
Давление рабочих газов, Па	(1...3)·10 ⁵
Расход диффузانتов при давлении 1...2,5 Па, м ³ /с	2,5·10 ⁻⁶
Расход воды при температуре 20...25° С и давлении 4...4,5·10 ⁵ Па, м ³ /с	1,67·10 ⁻³
Потребляемая мощность, кВт А	300
Напряжение питания, В	380/220 (50 Гц)

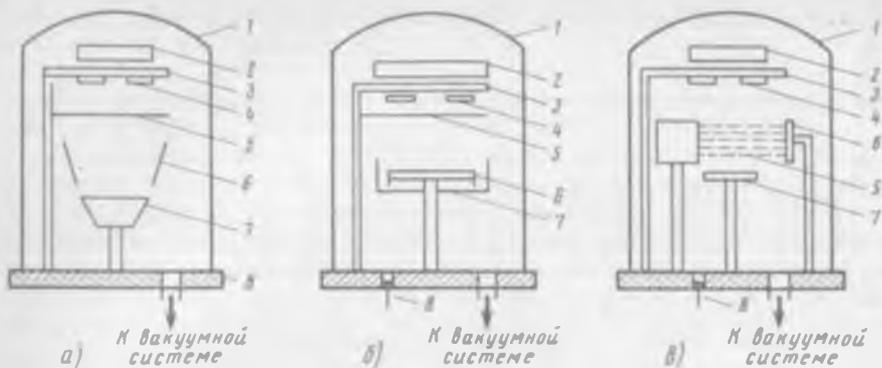


Рис. 1.12. Методы нанесения слоев:

а — термовакuumное; *б* — катодное распыление; *в* — ионно-плазменное распыление

Слой металлов и диэлектриков. Основным методом получения тонких слоев металлов и диэлектриков служит нанесение их в вакууме. В основе метода лежат испарение материала при разогреве и последующая конденсация паров на подложке. Технологический процесс требует создания в рабочей камере разряжения и определенного состава среды. В самом процессе выделяют три фазы: образование потока вещества из испарителя, формирование потока в пространстве «испаритель—подложка» и конденсация паров на подложке.

Можно выделить три основных способа, используемых для получения слоев (рис. 1.12): термовакuumное нанесение, катодное распыление, ионно-плазменное распыление.

При термовакuumном распылении наносимое вещество испаряется с помощью резистивного нагрева или электронного луча. Давление в рабочей камере в этом случае должно быть на несколько порядков ниже, чем парциальное давление паров испаряемого вещества. Поток паров — атомарный и проходит без соударений, т. е. расстояние «испаритель—подложка» меньше длины свободного пробега. Это определяет требования к высокому вакууму в рабочем объеме — под колпаком установки. Для обеспечения конденсации подложка должна иметь определенную температуру.

При термовакuumном нанесении (рис. 1.12, *а*) под колпаком 1 размещаются нагреватель подложки 2, подложкодержатель 3 с подложками 4. Для нанесения слоев одинаковой толщины на все подложки подложкодержатель приводится во вращение специальным приводом, размещаемым обычно вне рабочей камеры.

Время, в течение которого может наноситься слой, определяется положением заслонки 5. Заслонка также защищает поверх-

ность пластины от попадания посторонних примесей при прогреве камеры для обезгаживания. Для предохранения внутренней поверхности колпака от запыления применяются экраны 6. Испаряемое вещество помещается в испаритель 7. Испаритель может быть выполнен в виде тигля, лодочки из тугоплавкого металла или керамики или представляет собой спираль, на которую навешаны частицы испаряемого вещества.

Плита 8 служит для установки всех устройств, через ее уплотненные вводы приводятся в движение механизмы подколпачных устройств и подается электропитание. Плита имеет отверстие для соединения с вакуумной системой.

Катодное распыление (рис. 1.12, б) проводится при низком вакууме (66...1,133 Па) в среде нейтрального газа. Распыление вещества происходит под действием бомбардировки катода ионизированными молекулами газа.

Для выполнения операции в рабочей камере 1 имеются анод 2 и подложкодержатель 3 с подложками 4. Время нанесения пленки отсчитывается с момента открытия заслонки 5. Испаряемым является материал катода 6 или вещество, помещаемое на его поверхность. Катод прикрыт экраном 7. Давление в камере во время технологического процесса стабилизируется за счет управляемого натекания через игольчатый натекатель 8. Вакуумная система установки при этом работает непрерывно.

Ионно-плазменное распыление (рис. 1.12, в) проводится при давлении 0,13...0,07 Па. В камере 1 установлен подогреватель подложек 2, рядом с которым находится подложкодержатель 3 с подложками 4. Источник ионов 6 и анод 5 создают в камере ионизированную плазму. Отрицательный потенциал, подаваемый на мишень 7, вытягивает из плазмы ионы, которые, бомбардируя мишень, распыляют ее. Давление в камере регулируется игольчатым натекателем 8.

Достоинства методов катодного и ионно-плазменного нанесения слоев заключаются в их высокой производительности, хорошей воспроизводимости получаемых слоев и универсальности. Недостатком методов является проведение процессов в низком вакууме, что не позволяет получать слои с особо чистым составом.

Большим недостатком вакуумных установок является значительное время откачки рабочего объема, поэтому в последние годы стремятся получить установки непрерывного действия за счет создания шлюзовых камер для загрузки и выгрузки. Описание вакуумной установки непрерывного действия «Магна-2» приведено в гл. 7.

Слой оксида. Слои диоксида кремния используются в ИМС для изоляции при многослойной разводке, защиты поверхности кристалла и маскирования в литографии. Наиболее распространенным способом является получение оксида с помощью термического окисления, выполняемого в диффузионных печах. В этом

Подсистемы	Назначение и вид технологического процесса							
	Обработка поверхности		Литография		Формирование свойств		Нанесение слоев	
	ЖХТ	ПВТ	ФП	ЭЛ	Д	И	Э	НС
Легирование								
Осаждение								
Травление	ЖХТ	ПВТ						
Экспонирование								
Распыления								
Нагрева								
Охлаждения								
Термостатирования								
Подачи газов								
Откачки								
Позиционирования								
Загрузки и шлюзования								
Транспортирования								
Энергообеспечения								
Пылезащиты								
Защиты								

Назначение подсистем:

-  — технологическое
-  — обеспечивающее
-  — технологическое и обеспечивающее
-  — вспомогательные

Рис. 1.13. Типичные подсистемы технологического оборудования:

ЖХТ — жидкостное химическое травление; ПВТ — вакуумно-плазменное травление; ФП — фотопечать; ЭЛ — электронная литография; Д — диффузия; И — имплантация; Э — эпитаксия; НС — нанесение слоев

случае окисление кремния проводится путем пропускания через кварцевую трубу сухого и влажного кислорода в течение заданного времени.

Кроме термического окисления применяется пиролитическое осаждение. Этот процесс проводится при более низких температурах и использует реакцию между силаном и кислородом на поверхности пластины.

Возможно применение катодного и ионно-плазменного распыления кремния в смеси кислорода и аргона. Выбор метода нанесения определяется назначением слоя и совместимостью процесса с другими операциями технологии.

1.7. СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Анализ различных видов оборудования, применяемого в производстве ИМС, позволяет выделить в его составе типичные функциональные подсистемы (рис. 1.13). По назначению их можно разделить на три группы:

технологические, результаты работы которых непосредственно влияют на свойства ИМС;

обеспечивающие, создающие условия эффективного процесса обработки; результаты работы этих систем сказываются на качестве ИМС опосредованно;

вспомогательные, участвующие в выполнении операций по транспортированию предметов труда и защите.

При проектировании оборудования функции различных подсистем могут совмещаться. Технологические и обеспечивающие подсистемы определяют особенности выполнения операций, а вспомогательные являются общими для различных видов оборудования.

Основная задача подсистемы энергообеспечения — снабжение оборудования электроэнергией, сжатым воздухом, горячей водой и т. п. Причем качество энергоносителя должно удовлетворять требованиям технологического процесса. Включение в состав оборудования подсистемы защиты вызвано использованием в технологических процессах токсичных и взрывоопасных веществ, наличием высокого напряжения. В задачи подсистемы входят:

обеспечение безопасности обслуживающего персонала, что достигается применением блокировок, предотвращающих несанкционированный или случайный доступ к частям оборудования, опасным для человека;

экологическая защита, что достигается нейтрализацией опасных для окружающей среды продуктов реакции;

аварийная защита оборудования и предметов труда.

Разнообразие транспортных систем определяется условиями выполнения технологического процесса, например в вакууме, тепловом и электромагнитном поле, и организацией передачи предметов труда поштучно в транспортных или технологических кассетах. При повышении уровня автоматизации требования к транспортным системам возрастают.

Микропроцессорная система управления (МПСУ) является обязательной частью всех видов технологического оборудования и обеспечивает согласованное функционирование устройств, входящих в подсистемы. Технические средства ее должны реализовывать функции управления, измерять параметры подсистем (технологических процессов, изделий, создаваемых структур и т. п.), преобразовывать и обрабатывать полученную информацию и формировать управляющие воздействия на объект управления.

На рис. 1.14 представлена структурная схема технических

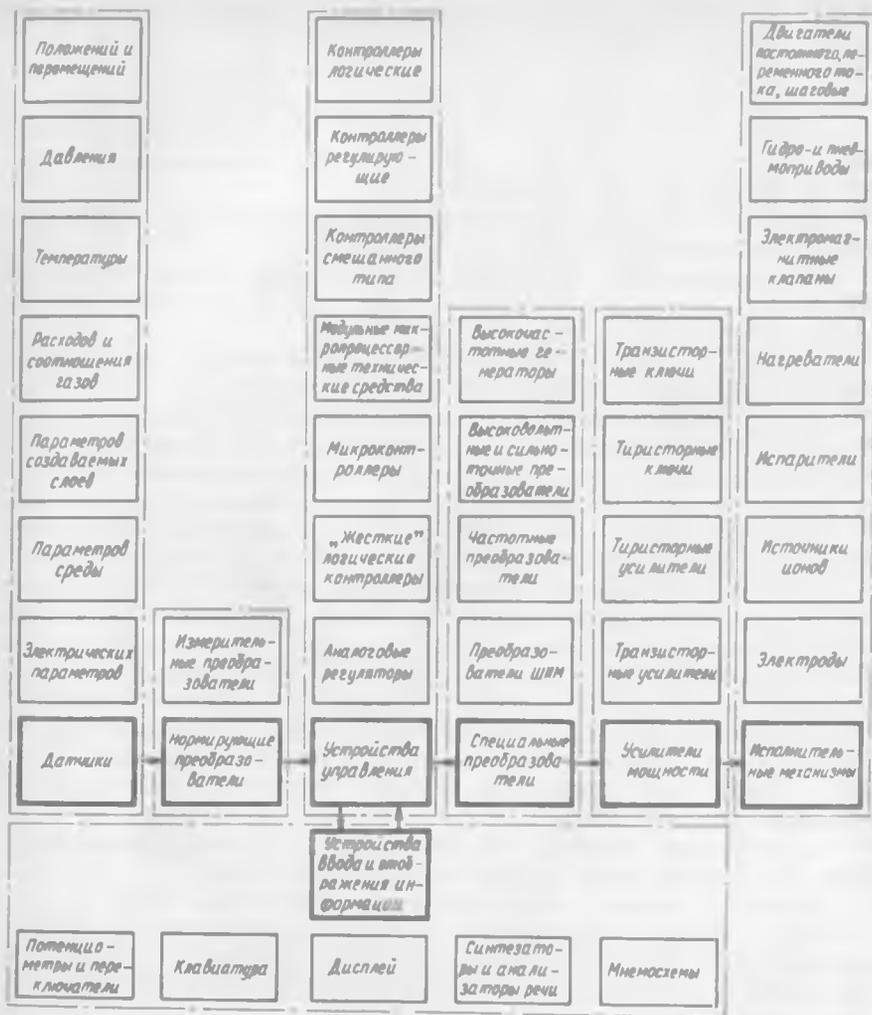


Рис. 1.14. Структура и состав технических средств микропроцессорной системы управления оборудованием

средств МПСУ. Центральное место в ней занимают микропроцессорные устройства управления — программируемые логические и регулирующие контроллеры, контроллеры смешанного типа, микроконтроллеры.

Вместе с тем, в системах управления даже с микропроцессорными средствами управления нередко используют аналоговые регуляторы и «жесткие» логические контроллеры. Применение

указанных типов устройств обусловлено в ряде случаев необходимостью создания двухконтурных систем регулирования, что значительно улучшает динамические характеристики систем стабилизации и подсистем безопасности и защиты оборудования.

Важным элементом системы управления являются датчики параметров функциональных подсистем и параметров обрабатываемых изделий. Разнообразие физико-термических процессов, реализуемых в оборудовании, трудности измерения параметров создаваемых структур делают задачу контроля весьма сложной.

В качестве измерительных преобразователей используются как серийно выпускаемые средства, так и специальные преобразователи, разработанные для конкретных технологических процессов. Для сопряжения измерительных преобразователей с устройствами микропроцессорного управления используются нормирующие преобразователи, которые с высокой точностью усиливают напряжение низкого уровня измерительных преобразователей до стандартного уровня 0...10 В.

Управляющие воздействия с устройства управления поступают на исполнительные механизмы (рис. 1.14) оборудования через усилители мощности и специальные преобразователи.

Задание программы управления, параметров технологического процесса и контроль за протеканием процесса производятся с помощью устройств ввода и отображения информации. В микропроцессорных системах управления такими устройствами являются дисплей и клавиатура. В последние годы в системах управления находят все более широкое применение акустические устройства общения человека с ЭВМ: синтезаторы и анализаторы речи. Вместе с тем, наряду с современными средствами отображения информации в оборудовании применяются и такие средства, как мнемосхемы, на которых выводится информация о состоянии отдельных устройств и подсистем.

2.1. УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА БАЗЕ МИКРОЭВМ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ КОМПЛЕКТОВ БИС

Термины и определения. Приведем определения основных терминов, используемых при дальнейшем изложении материала.

Большая интегральная схема (БИС) — полупроводниковая интегральная микросхема, содержащая 500 и более элементов.

Интерфейс — устройство сопряжения, обеспечивающее информационную, электрическую и конструктивную совместимости, а также взаимодействие технических средств в составе системы.

Микропроцессор (МП) — программно-управляемое устройство, осуществляющее процесс обработки цифровой информации и управление им, построенное на одной или нескольких интегральных микросхемах. В состав микропроцессора входят: арифметическо-логическое устройство (АЛУ), выполняющее арифметические, логические и другие операции; блок регистров, реализующий внутреннюю память МП; устройство управления (УУ), вырабатывающее управляющие и синхронизирующие сигналы и определяющее алгоритм функционирования МП в соответствии с кодом поступившей команды, и интерфейс для связи с внешними устройствами.

Разрядность микропроцессора — максимальное число двоичных разрядов в слове, которое обрабатывается в МП параллельно. Например, 8-разрядный МП может обработать параллельно слово с максимальной длиной в один байт (8 бит). Обработка 16-разрядного слова осуществляется в этом МП последовательно, с разделением слова на два байта, каждый из которых обрабатывается параллельно. Таким образом, разрядность МП существенно влияет на его производительность — число производимых операций в единицу времени. Так, при обработке 16-разрядных слов производительность 16-разрядного МП в два раза выше, чем 8-разрядного МП при условии, что оба процессора имеют одинаковую архитектуру, построены на одной и той же элементной базе и работают с одной и той же тактовой частотой.

Микропроцессорная интегральная микросхема — интегральная микросхема, выполняющая функцию микропроцессора или его части.

Микропроцессорная секция — микропроцессорная интегральная микросхема, реализующая часть микропроцессора и обладающая средствами простого функционального объединения с однотипными или другими ИМС для построения законченных микропроцессоров, микроконтроллеров или микроЭВМ.

Секционированный микропроцессор — микропроцессор, выполненный на основе нескольких (n) идентичных микропроцессорных секций и других микропроцессорных интегральных схем, объединенных специальными связями или схемами. Число n микропроцессорных секций в составе секционированного МП может меняться, благодаря чему могут изменяться (наращиваться) его разрядность и функциональные возможности.

Однокристалльный микропроцессор (ОМП) — микропроцессор, выполненный в виде одной БИС.

Запоминающее устройство (ЗУ) — устройство, предназначенное для записи, хранения и выдачи информации. В зависимости от используемого физического принципа может быть построено на ферритах, полупроводниках, цилиндрических магнитных доменах и т. д.

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) — запоминающее устройство, обеспечивающее возможность оперативного изменения информации, в том числе во время выполнения программы, и имеющее длительность цикла обращения, соизмеримую с длительностью цикла выполнения МП основных операций. При отключении электропитания информация в ОЗУ, как правило, не сохраняется. При использовании аварийного электропитания получают энергонезависимое ОЗУ.

Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) — запоминающее устройство с неизменяемым содержимым памяти. В полупроводниковые ПЗУ информация записывается в процессе изготовления микросхемы путем соответствующего соединения запоминающих элементов на поверхности кристалла. В процессе работы информация из ПЗУ может только считываться. Постоянное ЗУ является энергонезависимым, т. е. при отключении электропитания информация, записанная в ПЗУ, не разрушается.

Программируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ) — постоянное запоминающее устройство, в которое информация заносится однократно потребителем и не может быть впоследствии изменена. В полупроводниковые ППЗУ информация заносится путем пережигания плавких перемычек на поверхности кристалла.

Репрограммируемое постоянное запоминающее устройство (РПЗУ) — постоянное запоминающее устройство, в котором информация может неоднократно изменяться специальными средствами стирания и записи. Для записи новой информации микросхема РПЗУ, как правило, извлекается из изделия и соединяется со специальным программатором. Стирание информации осуществляется при помощи ультрафиолетового облучения (УФ РПЗУ), электрически (Э РПЗУ) и т. п. Запись новой информации производится посредством подачи электрических сигналов на соответствующие выводы интегральной микросхемы РПЗУ.

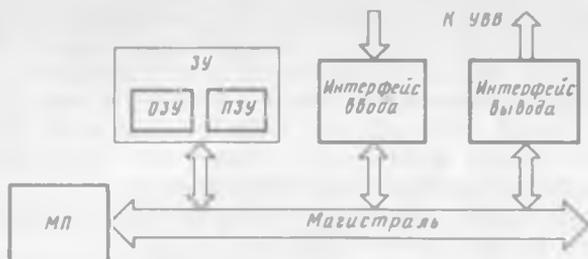


Рис. 2.1. Обобщенная структурная схема микроЭВМ

Микропроцессорная электронная вычислительная машина (микроЭВМ) — цифровая электронная вычислительная машина, включающая микропроцессор (МП), интерфейсы ввода и вывода, запоминающее устройство (ЗУ) и при необходимости пульт управления и источники электропитания, объединенные общей несущей конструкцией (рис. 2.1).

Однокристалльная микроЭВМ (ОЭВМ) — микроЭВМ, выполненная в виде одной БИС.

Микропроцессорный комплект (МПК) БИС — совокупность микропроцессорных и других ИМС, совместимых по информационным, электрическим и конструктивным параметрам и предназначенных для совместного использования в составе МП, микроЭВМ и других технических средств.

Архитектура микроЭВМ — совокупность взаимосвязанных аппаратных и программных средств, доступных пользователю и обеспечивающих реализацию алгоритмов обработки информации.

Шина (магистраль, канал) — набор определенного числа линий (соединительных проводников), связывающих между собой одноименные выходы различных устройств. По каждой линии связи шины может быть передано значение одного разряда двоичного кода в виде уровней напряжения (тока), соответствующих логическому «0» или логической «1», а по всей шине в целом, параллельно — значение кода, число разрядов в котором равно числу проводников в шине. Особенностью шин является то, что каждая линия связи шины может объединять несколько (более двух) одноименных выводов и, например, соединять выходы нескольких передатчиков и входы нескольких приемников информации. Выбор приемника или передатчика информации в этом случае осуществляется с помощью специальных сигналов ВК (выбор кристалла) или ВМ (выбор модуля). Из нескольких передатчиков информации, связанных с одним приемником, в каждый момент времени может быть подключен только один. Это реализуется с помощью схем с открытым коллектором или с тремя устойчивыми состояниями. Третье (пассивное) состояние передатчика, характеризуемое его высоким выходным сопротивлением, эквивалентно отключению передатчика от линии связи.

Двунправленная шина (магистраль) — шина (магистраль), по которой осуществляется двунправленный обмен информацией между различными устройствами. Следует заметить, что в каждый фиксированный момент времени информация по шине (магистрале) может передаваться только в одном направлении. Например, сначала по магистрале микроЭВМ (см. рис. 2.1) передается информация из ЗУ в МП, затем по той же магистрале передается информация в обратном направлении из МП в ЗУ и т. д.

Внешнее запоминающее устройство (ВЗУ) — запоминающее устройство большого объема (сотни, тысячи и более килобайт), предназначенное для длительного хранения данных, создания архива данных и обмена файлами этих данных с ОЗУ микропроцессорной системы. Внешнее ЗУ в общем случае состоит из накопителя (на магнитной ленте, магнитных дисках, магнитных картах и т. д.) и контроллера.

Контроллер ВЗУ — устройство, обеспечивающее управление работой накопителя и сопряжение с интерфейсом микропроцессорной системы.

Устройства ввода-вывода (УВВ) — устройства, служащие для ввода или вывода информации, например клавиатура, алфавитно-цифровой или графический дисплей, печатающие устройства различных типов, перфоленточные устройства и т. д. В последнее время в качестве УВВ активно применяются накопители на гибких магнитных дисках (НГМД) и кассетные накопители на магнитной ленте (КНМЛ), которые заменяют устройства ввода с перфоленты и перфокарты.

Периферийные или внешние устройства — обобщающее название ВЗУ и УВВ.

Порты ввода или вывода — регистры для подключения внешних устройств. Каждому из этих регистров обычно присваивается свой номер (адрес). С помощью сигналов выбора кристалла (ВК) или выбора модуля (ВМ), подаваемых с дешифратора адреса, регистры приводятся в активное состояние.

Микроконтроллер (МК) — устройство локального управления, выполненное на одной или нескольких ИМС. Микроконтроллер предназначен для автономного встраивания в аппаратуру и содержит микропроцессор, ОЗУ и ПЗУ ограниченного объема, средства связи с источниками и приемниками информации, а также средства объединения в микропроцессорные локальные сети.

Устройство связи с объектом (УСО) — устройство, осуществляющее связь микроЭВМ с объектом управления (датчиками и исполнительными устройствами объекта управления) и позволяющее производить прием аналоговых и дискретных сигналов, выдачу команд на аналоговые и дискретные устройства, усиление и нормирование сигналов, аналого-цифровое и цифроаналоговое преобразования, логические преобразования, преобразования фор-

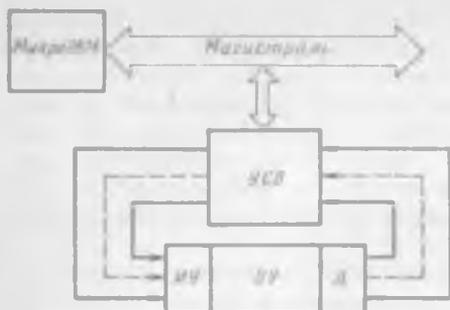


Рис. 2.2. Обобщенная структурная схема микропроцессорной системы управления

матов данных, развязку внешних цепей и защиту их от короткого замыкания, контроль и диагностику, а также внутренние преобразование, связанные с хранением адресов и данных.

В состав УСО входят интерфейсы для связи с микроЭВМ и объектом управления, регистры для хранения адресов и данных, аналого-цифровой (АЦП) и цифроаналоговый (ЦАП) преобразователи, логические устройства, формирователи сигналов, устройства оптронной развязки, устройства индикации и защиты и т. д.

Микропроцессорная система управления (МПСУ) — система (рис. 2.2), содержащая микроЭВМ, объект управления (ОУ) с датчиками (Д) и исполнительными устройствами (ИУ), устройства связи с объектом (УСО) и при необходимости периферийные устройства (дисплей, алфавитно-цифровое печатающее устройство, накопитель на гибких магнитных дисках и т. п.).

Регистры общего назначения (РОН) — программно-доступные регистры, которые реализуют внутреннюю память МП. Используются для оперативного хранения как данных, так и адресов.

Счетчик команд — программно-доступный регистр МП, который содержит адрес очередной команды. При выполнении команды содержимое счетчика команд автоматически изменяется.

Стек — любая область ОЗУ, работа с которой осуществляется по принципу «последний пришел — первый ушел». Для адресации ячеек памяти, входящих в стековую область, используется специальный адресный регистр SP — указатель стека. Перед началом работы в регистр SP загружается адрес «верхушки» стека, т. е. максимальный из адресов ячеек памяти, входящих в стековую область ОЗУ. Так как емкость ячейки ОЗУ обычно составляет один байт, то запись любого слова в стек происходит побайтно. При занесении в стек 16-разрядного слова содержимое SP автоматически уменьшается на единицу и в ячейку памяти, адрес которой находится в SP, записывается старший байт слова. Далее содержимое SP снова автоматически уменьшается на единицу и в ячейку памяти с адресом на единицу меньше предыдущего записывается младший байт слова. Извлечение данного слова из

стека происходит в обратном порядке. После извлечения каждого байта содержимое указателя стека автоматически увеличивается на единицу. Таким образом, при каждом обращении к стеку можно либо извлечь ранее записанное слово из ячейки памяти, адрес которой хранится в указателе стека SP, либо записать новое слово по адресу, который на единицу меньше, чем содержимое регистра SP. Указанные возможности реализуются с помощью двух типов команд. Выполнение одной из них приводит к извлечению ранее записанного слова из стека, выполнение другой — к занесению нового слова в стек.

Операнд — исходные данные, представленные в виде двоичного слова длиной от одного до нескольких байт, над которым выполняется операция.

Команда — двоичный код, длина (формат) которого составляет от одного до нескольких байт. Первый байт любой команды содержит код операции. Он определяет формат команды и те действия, которые должны быть произведены МП над операндом (операндами), чтобы получить результат. В последующих байтах команды содержится прямой или косвенный адрес операнда, либо непосредственно сам операнд. Под прямым адресом операнда понимается адрес ячейки ОЗУ или номер внутреннего регистра МП, в которой (котором) хранится операнд. Косвенный адрес операнда — номер внутреннего регистра МП, в котором хранится прямой адрес операнда.

Прерывание — временное прекращение МП выполнения текущей программы и переход к программе обслуживания периферийного устройства, вызвавшего прерывание. Например, в ходе выполнения микропроцессором программы вычислений устройство ввода информации выдает сигнал «Запрос прерывания», который поступает на соответствующий вход МП. По окончании текущей команды МП выдает сигнал «Разрешение прерывания», временно прекращает выполнение текущей программы и переходит к программе обслуживания устройства ввода, которая начинается с занесения содержимого всех программно-доступных регистров МП в стек. В конце программы обслуживания устройства, вызвавшего прерывание, содержимое всех внутренних регистров МП восстанавливается, и МП возобновляет выполнение текущей программы.

Режим прямого доступа к памяти — предоставление микропроцессором шин адресов и данных для обмена информацией УВВ с ЗУ. На время, в течение которого существует этот режим, МП отключаются от указанных шин (соответствующие выходы МП устанавливаются в состояние с высоким выходным сопротивлением).

Типы микропроцессорных комплектов БИС и архитектура микропроцессоров, микроЭВМ и микропроцессорных систем управления. Основу любой микроЭВМ составляет микропроцессор.

Микропроцессор осуществляет процессы обработки, хранения, обмена над тремя видами информационных слов — адресами, командами, данными — и управляет этими процессами.

Обработка информации выполняется в самом МП. Хранение (память) информации реализуется с помощью внутренних регистров МП, БИС ОЗУ и БИС ПЗУ, а обмен информацией — по внутренним и внешним шинам или магистралям.

Микропроцессор выставляет необходимые адреса, выбирает команды из ЗУ, декодирует эти команды и исполняет их, осуществляет обмен данными с УВВ и ЗУ, выполняет арифметические, логические и другие операции обработки информации, передает и принимает синхронизирующие и управляющие сигналы.

Промышленность СССР в настоящее время выпускает более 20 микропроцессорных комплектов БИС. Характеристики некоторых из них представлены в табл. 2.1.

Микропроцессор как ИМС (или совокупность нескольких микропроцессорных ИМС) характеризуется видом технологии изготовления, типом корпуса и числом его выводов, нагрузочной способностью активных выходов, номиналами источников питания, потребляемой мощностью, помехоустойчивостью, устойчивостью к механическим, климатическим и радиационным воздействиям и т. д.

Таблица 2.1. Характеристики микропроцессорных комплектов БИС

Обозначение МПК БИС	Технология изготовления	Разрядность	Тактовая частота, МГц	Способ управления	Тип микропроцессора
КР580	<i>n</i> -МДПТЛ	8	2,5	Аппаратный с фиксированной системой команд	ОМП
К1810	<i>n</i> -МДПТЛ	16	—	То же	»
К1816	<i>n</i> -МДПТЛ	8	6,0	»	Однокристалльная микроЭВМ
КР581ВЕ1	<i>n</i> -МДПТЛ	16	2,0	Микропрограммный, система команд «Электроники-60»	ОМП
КР588	<i>k</i> -МДПТЛ	16	1,0	То же	»
К1801/К1809	<i>n</i> -МДПТЛ	16	5,0	»	»
К145	<i>p</i> -МДПТЛ	4	0,032	Аппаратный	»
К583	ИИЛ	8* <i>n</i>	1,0	Микропрограммный с произвольной системой команд	Секционированный
К589	ТТЛДШ	2 <i>n</i>	8,0	То же	»
К1800	ЭСЛ	4 <i>n</i>	36,0	»	»
КР1802	ТТЛДШ	8 <i>n</i>	8,0	»	»
КР1804	ТТЛДШ	4 <i>n</i>	8,0	»	»

Примечание: *n* — число объединяемых микропроцессорных секций.

Микропроцессор как вычислительное устройство характеризуется разрядностью и возможностью ее наращивания, тактовой частотой, числом команд и способом их реализации (способом управления), числом внутренних регистров и объемом адресуемой памяти, числом входных и выходных шин и их разрядностью, типом интерфейса, объемом программного обеспечения и т. д.

Сравнительный анализ БИС, изготовленных по различным технологиям, показывает, что наибольшую плотность упаковки (степень интеграции) имеют элементы ИИЛ (интегрально-инжекционной логики) ≈ 150 вентиляей /мм². Наивысшим быстродействием (минимальным временем задержки распространения сигнала) обладают элементы ЭСЛ (эмиттерно-связанной логики) и ТТЛДШ (транзисторно-транзисторной логики с диодами Шотки), что позволяет им работать с тактовыми частотами 10...100 МГц (ЭСЛ) и 5...10 МГц (ТТЛДШ). Однако плотность упаковки элементов ЭСЛ и ТТЛДШ невысокая и составляет 25 вентиляей/мм². Минимальную потребляемую мощность (0,01...0,2 Вт/кристалл) имеют элементы *k*-МДПТЛ (транзисторной логики на основе полевых транзисторов со структурой «металл-диэлектрик-полупроводник» с каналами *n*- и *p*-типов). Для сравнения заметим, что потребляемая ТТЛДШ мощность составляет 2...3 Вт/кристалл. Элементы *n*-МДПТЛ и *p*-МДПТЛ обеспечивают достаточно высокую степень интеграции (≈ 100 вентиляей/мм²), но в основном уступают элементам ИИЛ, имеющим лучшую перспективу использования.

Микропроцессор обеспечивает автоматическое выполнение операций обработки цифровой информации в строгом соответствии с программой, т. е. заданной последовательностью команд.

Существуют два способа реализации команд, т. е. два способа управления — аппаратный (макропрограммный) и микропрограммный.

При аппаратном способе управления используются дешифраторы кодов команд, которые преобразуют код каждой команды в набор микроинструкций, необходимых для ее выполнения.

При микропрограммном способе управления каждая сложная команда представляется в виде микропрограммы, состоящей из микрокоманд. Процесс составления таких микропрограмм называется микропрограммированием. Микропрограммная реализация сложных команд позволяет установить собственный набор команд, оптимальных для решения некоторых конкретных задач. Это делает МП наиболее «гибким», т. е. дает возможность максимально приспособить его для решения широкого круга задач, а также интерпретировать архитектуру различных ЭВМ, используя их программное обеспечение. Аппаратный способ реализации команд принципиально не допускает такой возможности.

Широкое распространение получили два типа микропроцессоров: секционированные с наращиваемой разрядностью и микропрограммным управлением и однокристалльные (ОМП) с фиксированными разрядностью и системой команд.

Секционированный микропроцессор реализуется на основе нескольких идентичных микропроцессорных секций и других микросхем, объединенных специальными связями или схемами. Например, 2-, 4-, 8-разрядные микропроцессорные секции МПК БИС серий К589, К1800, К1802 (см. табл. 2.1) соответственно объединяются с помощью схем ускоренного переноса и вместе с БИС ПЗУ, предназначенной для хранения микрокоманд, образуют секционированные микропроцессоры с наращиваемой разрядностью $2n$, $4n$, $8n$ и микропрограммным управлением, набор команд для которых может быть определен произвольно. Микропроцессорные секции, как правило, строятся на элементах ЭСЛ и ТТЛДШ. Поэтому секционированные МП позволяют реализовать микроЭВМ с максимальным быстродействием ($\approx 10^7$ элементарных операций/с и больше).

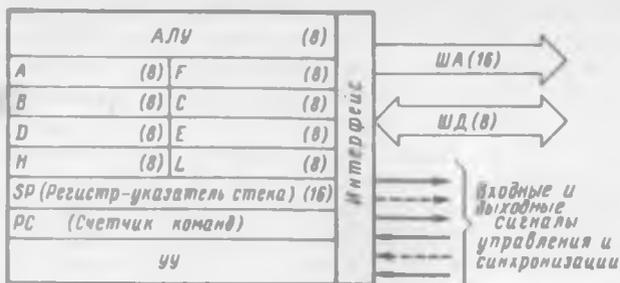
Однокристалльные микропроцессоры рассмотрим на примере 8-разрядного ОМП КР580ИК80А и 16-разрядного ОМП К1801ВМ1, предназначенных для обработки информации в микропроцессорных системах управления технологическими процессами, контрольно-измерительной аппаратуре и различных микроЭВМ.

ОМП КР580ИК80А (рис. 2.3,а) содержит следующие устройства и программно-доступные регистры:

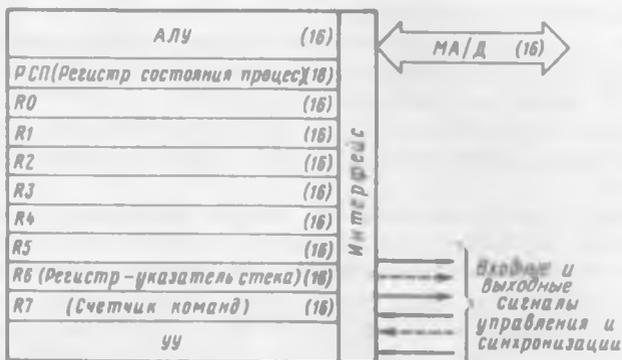
8-разрядные арифметическо-логическое устройство (АЛУ);

8-разрядный регистр А (аккумулятор), который используется для оперативного хранения операнда и результата операции, производимой в АЛУ;

8-разрядный регистр F, в котором вырабатываются двоичные признаки состояния, соответствующие определенным разрядам регистра F, например: Z—признак нуля (устанавливается в состояние «1», если результат выполнения команды равен 0), S—признак знака (устанавливается в состояние «1», если результат выполнения команд отрицательный), P—признак четности (устанавливается в состояние «1», если в двоичном коде результата выполнения команды содержится четное число единиц), C—признак переноса (устанавливается в состояние «1», если в результате сложения двух 8-разрядных чисел возникает перенос из самого старшего разряда), AC—признак вспомогательного переноса (устанавливается в состояние «1» в случае переноса из четвертого разряда двоичного числа). Значения признаков, содержащихся в регистре F, проверяются при выполнении команд условного перехода. Содержимое пары регистров А и F называют словом состояния программы и обозначают PSW;



а)



б)

Рис. 2.3. Логическая структура микропроцессоров с фиксированными разрядностью и системой команд:

а — 8-разрядный ОМП КР580ИК80А; б — 16-разрядный ОМП К1801ВМ1

шесть 8-разрядных регистров общего назначения: В, С, D, E, H, L. При исполнении некоторых команд указанные регистры объединяются в 16-разрядные регистровые пары В и С, D и E, H и L с именами В, D, H соответственно;

16-разрядный счетчик команд (PC);

устройство управления (УУ) с аппаратной реализацией фиксированной системы команд;

интерфейс для подключения однонаправленной 16-разрядной шины адреса (ША), двунаправленной 8-разрядной шины данных (ШД) и входных (выходных) линий связи, по которым принимаются (передаются) соответственно сигналы управления и синхронизации.

Шина адреса позволяет микропроцессору обращаться к $64 \text{ К} (2^{16} = 2^6 \cdot 2^{10} = 64 \cdot 1024 = 64 \text{ К})$ ячейкам памяти или адресовать 64 К байт, учитывая, что емкость одной ячейки памяти равна 1 байт.

ОМП К1801ВМ1 (рис. 2.3.б) содержит следующие устройства и программно-доступные регистры:

16-разрядное арифметическо-логическое устройство (АЛУ);

16-разрядный регистр состояния процессора (РСП), в котором при выполнении команд вырабатываются двоичные признаки, соответствующие определенным его разрядам, например: $Z=1$, если результат операции равен 0; $N=1$, если результат операции отрицателен; $C=1$, если в результате выполнения команды произошел перенос из самого старшего разряда; $V=1$, если в результате выполнения команды произошло арифметическое переполнение. Совокупность указанных признаков представляет собой код условий ветвления программы. Седьмой разряд РСП содержит информацию о текущем приоритете. Если этот разряд установлен в состояние «1», то прерывания от внешних устройств запрещены, иначе — разрешены;

восемь 16-разрядных регистров общего назначения $R0—R7$, причем регистр $R6$ используется в качестве указателя стека, а регистр $R7$ является счетчиком команд;

устройство управления УУ с микропрограммной реализацией системы команд, идентичной системе команд микроЭВМ «Электроника-60»;

интерфейс для подключения двунаправленной 16-разрядной совмещенной (мультиплексированной) магистрали адреса/данные (МА/Д), по которой с разделением по времени передаются коды адресов и данные входных (выходных) линий связи, по которым принимаются (передаются) соответственно сигналы управления и синхронизации. Магистраль А/Д позволяет микропроцессору адресовать 64 К байт или 32 К 16-разрядных слов.

В нашей стране серийно выпускаются микроЭВМ «Электроника-60М» (МС 1260.12), «Электроника НЦ-80-01Д» (МС 1201) с центральным процессором К1801ВМ1, «СМ-1800» с центральным процессором КР580ИК80А и другие, которые используются при автоматизации технологических процессов и научных исследований в различных отраслях народного хозяйства, в том числе в электронной промышленности.

Элементная база микроЭВМ непрерывно совершенствуется. В настоящее время уже существует однокристалльная микроЭВМ серии К1816 с архитектурой, аналогичной микроЭВМ «СМ-1800». МикроЭВМ «Электроника-60», выполненная на нескольких платах, может быть заменена на одноплатную микроЭВМ «Электроника НЦ-80-01Д». Эти микроЭВМ имеют одинаковую архитектуру, но быстродействие второй из них в 1,5 раза выше, чем первой.

Сейчас получили широкое распространение и имеют большую перспективу развития диалоговые вычислительные комплексы — (ДВК), выполненные на базе микроЭВМ «Электроника НЦ-80-01Д». Диалоговый вычислительный комплекс обладает хорошо развитым аппаратным и программным обеспечением, что позволяет использовать комплекс не только как основу микропроцессорной системы управления, но и как инструментальную

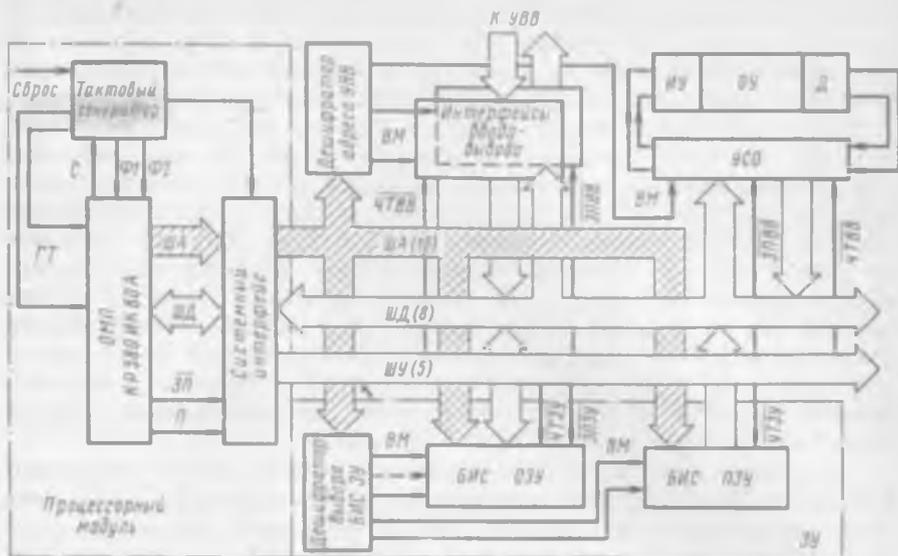


Рис. 2.4. Структурная схема МПСУ на основе ОМП КР580ИК80А

машину для отладки программ. Например, ДВК-2 («Электроника НЦ-80-20/2») включает в свой состав кроме одноплатной микроЭВМ алфавитно-цифровой дисплей, клавиатуру, накопитель на гибких магнитных дисках и термопечатающее устройство. Операционная система ДВК-2 обеспечивает работу с языками программирования Макроассемблер, Бейсик, Фортран, Паскаль, а также дает возможность редактировать, отлаживать и транслировать программы.

Отметим, что ДВК, микроЭВМ «Электроника-60», мини-ЭВМ «Электроника 100-25», «СМ-3» и «СМ-4» имеют одинаковую систему команд и являются совместимыми на аппаратном и программном уровнях, т. е. позволяют использовать стандартные периферийные устройства и программное обеспечение, разработанное для ЭВМ данного класса.

Рассмотрим структурную схему микропроцессорной системы управления на основе ОМП КР580ИК80А (рис. 2.4).

Микропроцессор, тактовый генератор и системный интерфейс образуют процессорный модуль, к которому с помощью системной магистрали подключают ЗУ, интерфейсы ввода—вывода и устройство связи с объектом, выполненные в виде модулей. Системная магистраль с тремя отдельными шинами—16-разрядной шиной адреса (ША), двунаправленной 8-разрядной шиной данных (ШД) и шиной управления (ШУ)—соответствует системному интерфейсу И-41. Конструктивное исполнение модулей может быть самым различным, например любой модуль системы

может быть выполнен на отдельной плате. В одноплатных МПСУ каждый модуль размещен на отдельном участке платы. В однокристалльных МПСУ каждый модуль занимает определенный фрагмент кристалла интегральной микросхемы. Каждое внешнее устройство (модуль) имеет вход для приема сигнала ВМ (выбор модуля). Наличие сигнала ВМ является необходимым условием для обмена информацией между внешним устройством и процессорным модулем. С помощью этого сигнала в фиксированный момент времени может «выбираться» только одно из внешних устройств МПСУ. Выходы «невывбранных» модулей находятся в высокоомном состоянии, т. е. отключены от ШД. Каждая ячейка памяти ЗУ и каждое УВВ имеют свои адреса. При обмене информацией МП выставляет на ША двоичный код адреса определенного УВВ или ячейки памяти ЗУ. Всего с помощью шины адреса МП может адресовать до 64 К ячеек памяти емкостью в один байт или до 256 УВВ.

Запоминающее устройство включает в свой состав несколько БИС ПЗУ (для хранения программ и констант) и БИС ОЗУ (для хранения оперативных данных). Все БИС имеют входы ВМ (или ВК — выбор кристалла). Сигналы ВМ или ВК формируются с помощью специального дешифратора, входы которого подключены к нескольким линиям (старшим разрядам) ША. Остальные линии связи ША подключены к соответствующим адресным входам всех БИС ЗУ, информационные входы и выходы которых связаны с ШД.

Запись информации в выбранную БИС ОЗУ, на вход ВМ которой подается одноименный сигнал, осуществляется по сигналу записи — ЗПЗУ, поступающему по ШУ от процессорного модуля. Считывание информации из выбранной БИС ЗУ, на вход ВМ которой подается одноименный сигнал, осуществляется по сигналу считывания (чтения) — ЧТЗУ, поступающему по ШУ от процессорного модуля.

Сигналы ВМ — выбора УВВ, включая УСО, формируются с помощью дешифратора адреса УВВ, восемь входов которого подключены к восьми линиям (младшим разрядам) ША. Каждый сигнал ВМ, осуществляющий выбор определенного УВВ, соответствует коду адреса этого УВВ, передаваемому по ША. В фиксированный момент времени МП может производить обмен информацией по ШД только с одним УВВ и только в одном направлении — либо информация передается от УВВ к МП (ввод, чтение), либо от МП к УВВ (вывод, запись). Ввод (чтение) информации из выбранного УВВ, на вход ВМ которого подается одноименный сигнал, осуществляется по сигналу ЧТВВ, поступающему по ШУ от процессорного модуля. Вывод (запись) информации в выбранное УВВ, на вход ВМ которого подается одноименный сигнал, осуществляется по сигналу ЗПВВ, поступающему по

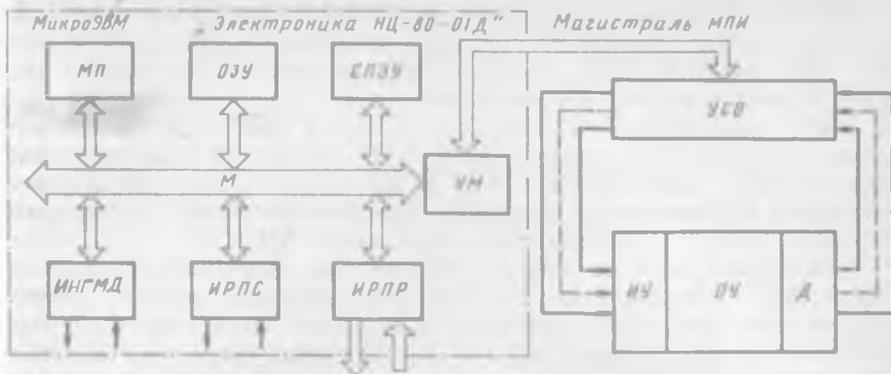


Рис. 2.5. Структурная схема МПСУ на основе микроЭВМ «Электроника НЦ-80-01Д»

ШУ от процессорного модуля. Причем УВВ подключаются к ШД через интерфейсы ввода — вывода, которые в простейшем случае представляют собой регистры (порты). Поэтому выбор необходимого УВВ, как правило, сводится к выбору его интерфейса (параллельного или последовательного).

Рассмотрим структурную схему микропроцессорной системы управления на основе микроЭВМ «Электроника НЦ-80-01Д» (рис. 2.5).

В состав микроЭВМ «Электроника НЦ-80-01Д» входят следующие устройства:

МП — однокристалльный микропроцессор K1801BM1;

ОЗУ — оперативное запоминающее устройство емкостью 28 К 16-разрядных слов. Оперативное ЗУ включает следующие БИС: K565PY3 (с динамическим хранением информации), K1801BP1-030 (устройство управления), K1801BP1-034 (буферный регистр данных) и др.;

СПЗУ — системное постоянное запоминающее устройство емкостью 4 К 16-разрядных слова, реализованное на БИС K1801PE1-000 и предназначенное для хранения программ режима начального пуска микроЭВМ, пультового режима работы микроЭВМ и начального загрузчика с накопителя на гибком магнитном диске;

ИНГМД — интерфейс накопителя на гибком магнитном диске, который выполнен на основе БИС K1801BP1-033 и предназначен для связи с НГМД «Электроника ГМД 7012»;

ИРПС — интерфейс для радиального подключения внешних устройств с последовательной передачей информации, например, алфавитно-цифрового дисплея 15ИЭ00-013-01; ИРПС выполнен на основе БИС K1801BP1-035 и содержит узел оптронной развязки;

ИРПР — интерфейс для радиального подключения внешних устройств с параллельной передачей информации, который включает БИС К1801ВП1-033 (устройство управления), К1801ВП1-034 (устройство передачи информации) и др.;

УМ — усилитель магистрали, который выполнен на микросхемах К531АП2П и предназначен для повышения нагрузочной способности магистрали и подключения дополнительных устройств пользователя, например, устройств связи с объектом, которые вместе с микроЭВМ составляют МПСУ.

Микропроцессор и другие устройства, входящие в состав микроЭВМ «Электроника НЦ-80-01Д», связаны между собой посредством системной магистрали (канала) магистрального параллельного интерфейса (МПИ). Та же самая системная магистраль может связывать между собой микроЭВМ и УСО в составе МПСУ. Системная магистраль МПИ включает в себя в двунаправленную 16-разрядную совмещенную магистраль адресов/данных (МА/Д), по которой с разделением во времени передаются параллельные коды адресов или данных, и линии связи для передачи управляющих и синхронизирующих сигналов. Магистраль МПИ позволяет организовать канал обмена информацией, аналогичный каналу микроЭВМ «Электроника-60», в котором связь между двумя устройствами осуществляется по принципу «активный — пассивный». Кроме ОМП активным может быть внешнее устройство в режиме прямого доступа к памяти.

Активное устройство управляет прохождением информации по системной магистрали, разрешает прерывание, обеспечивает предоставление прямого доступа к памяти. Пассивное устройство передает и принимает информацию только под управлением активного устройства.

При обращении микропроцессора к ЗУ или внешним устройствам возможны следующие виды обменов (циклов) информацией по системной магистрали: ввод (чтение), вывод (запись), ввод — пауза — вывод (чтение — модификация — запись). Цикл «Ввод — пауза — вывод» включает ввод данных, выполнение арифметико-логических операций и вывод результата без повторения передачи адреса, т. е. результат записывается по адресу последнего выбранного операнда.

Обмен информацией по системной магистрали иллюстрируется с помощью временных диаграмм (рис. 2.6). Активным уровнем для всех сигналов, представленных на временных диаграммах, является уровень логического «0».

Цикл «Ввод» (рис. 2.6.а), при выполнении которого данные передаются от пассивного устройства к активному, осуществляется следующим образом. Однокристалльный микропроцессор (активное устройство) выставляет на магистраль А/Д код адреса пассивного устройства, например УСО, и с некоторой задержкой во времени выдает сигнал СИА (синхронизации активного

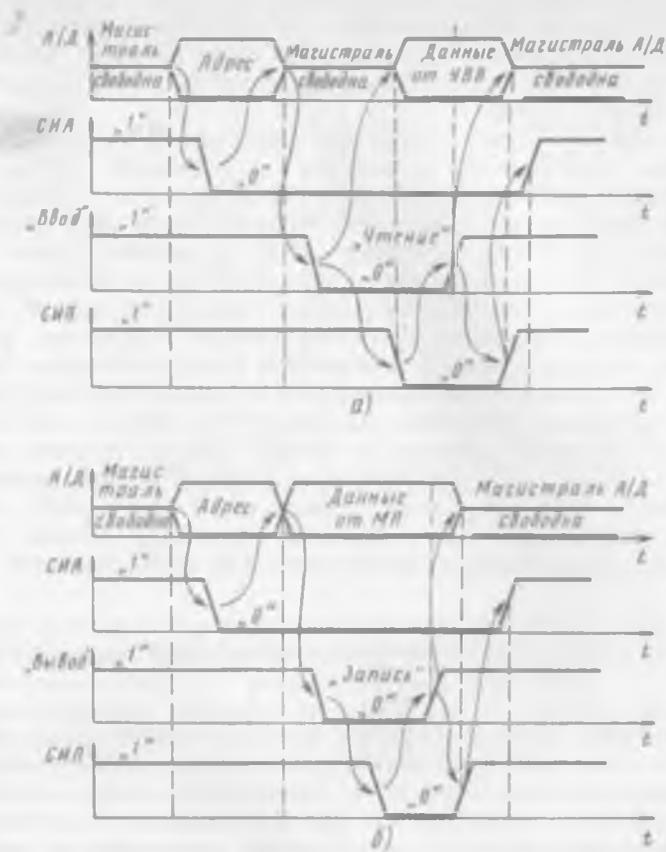


Рис 2.6. Временные диаграммы сигналов в системной магистрали микроЭВМ «Электроника НИ-80-01Д».

а — процедура ввода данных; б — процедура вывода данных

устройства). фронт (переход «1» в «0») которого указывает, что адрес установлен. Этот фронт сигнала СИА используется при записи кода адреса в специальный регистр пассивного устройства с целью сохранения адреса до конца цикла. После этого ОМП снимает адрес с магистрали А/Д (выходы А/Д микропроцессора переходят в третье состояние, характеризующееся высоким выходным сопротивлением), устанавливает на соответствующей линии связи сигнал «Ввод», который означает готовность ОМП к приему данных, и ожидает прихода сигнала СИП (синхронизация пассивного устройства), с помощью которого пассивное устройство информирует, что на магистраль А/Д выставлены данные, например закодированные значения параметров, снимаемые с датчиков объекта управления. После приема сигнала СИП ОМП

принимает данные от пассивного устройства и снимает сигнал «Ввод». Затем пассивное устройство снимает данные с магистрали А/Д и сигнал СИП с соответствующей линии связи. Далее ОМП снимает сигнал СИА.

Цикл «Вывод» (рис. 2.6,б), при выполнении которого данные передаются от активного устройства к пассивному, осуществляется следующим образом. Однокристалльный микропроцессор, как и в предыдущем случае, выставляет на магистраль А/Д код адреса пассивного устройства, например УСО, и выдает сигнал СИА. После этого ОМП снимает адрес и выставляет на магистраль А/Д данные, например закодированные значения управляющих воздействий для исполнительных устройств объекта управления, устанавливает на соответствующей линии связи сигнал «Вывод», который означает, что данные — на магистрали, и ожидает прихода сигнала СИП, с помощью которого пассивное устройство сообщает о готовности принять данные от ОМП. После приема сигнала СИП ОМП записывает данные в специальный регистр пассивного устройства и снимает сигнал «Вывод». Затем ОМП снимает данные о магистрали А/Д, пассивное устройство снимает сигнал СИП. Цикл заканчивается после того, как ОМП снимает сигнал СИА.

2.2. ИНТЕРФЕЙСЫ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

В настоящее время широкое распространение получил магистрально-модульный принцип построения радиоэлектронной аппаратуры, сущность которого заключается в том, что прикладная система комплектуется из стандартных и унифицированных функционально и конструктивно законченных современных модулей. Конструкция модулей обеспечивает возможность их механического объединения в соответствующем корпусе. Обычно модули вдвигаются по направляющим в корпус, причем для электрического объединения модулей используются соединители. В этом случае одна часть соединителя крепится на задней кромке модуля, а другая (ответная часть) — на задней стенке корпуса. Связь между различными модулями микропроцессорной системы осуществляется по магистральному системному интерфейсу.

С появлением микропроцессоров функциональная емкость модулей значительно повысилась. Сейчас уже созданы и используются однокристалльные модули в виде ИМС, унифицированные фрагменты печатных плат, вдвигаемые и автономные модули. Все виды модулей должны удовлетворять требованиям совместимости по интерфейсам, конструкции и программному обеспечению, что позволяет потребителю создавать прикладные системы из модулей, приобретенных у различных изготовителей.

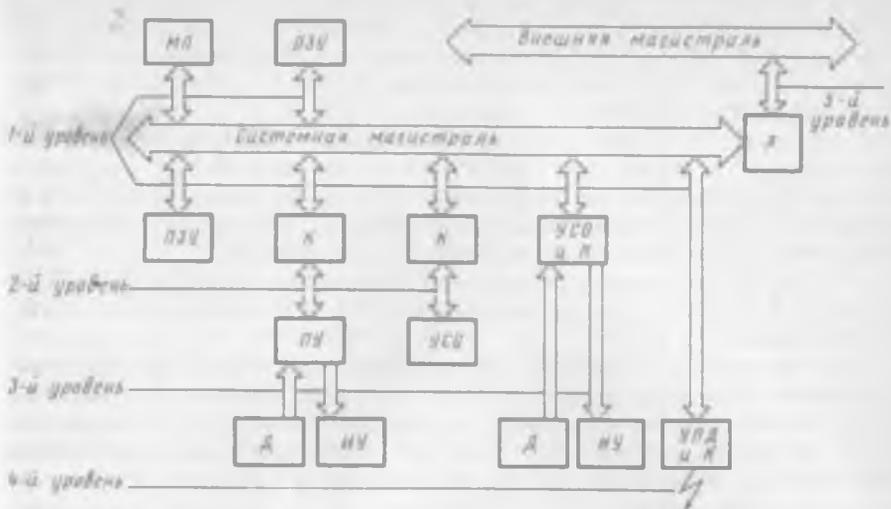


Рис. 2.7. Интерфейсы микропроцессорной системы управления

Магистрально-модульный принцип построения систем управления обеспечивает возможность их быстрого создания, наращивания, модернизации или реконструкции.

Классификация интерфейсов МПСУ. В микропроцессорных системах управления можно выделить следующие уровни сопряжения различных модулей и устройств (рис. 2.7).

Первый уровень сопряжения обеспечивается с помощью системного магистрального интерфейса, по которому осуществляется обмен информацией между всеми или основными модулями МПСУ. Выбор этого интерфейса определяется архитектурой микропроцессора.

В нашей стране получили распространение два типа системных интерфейсов. При использовании МПК БИС серий КР580, КР1810, К1816 и других применяется системный интерфейс И-41 с раздельными шинами для передачи адреса и данных. В случае использования МПК БИС серий К1801/К1809, К581, К588 и других применяется магистральный параллельный интерфейс МПИ (ГОСТ 26765.51-86) с совмещенной магистралью для передачи адреса и данных. Эти системные интерфейсы были рассмотрены в § 2.1.

Ко второму уровню сопряжения относятся малые интерфейсы периферийных устройств (ПУ) и устройств связи с объектом (УСО). Малые интерфейсы используются только в тех случаях, когда ПУ и УСО не имеют встроенного системного интерфейса и не могут подключаться непосредственно к системной магистрали. Наиболее широко используются радиальные интерфейсы СМ

ЭВМ: для подключения устройств с последовательной передачей информации ИРПС и параллельной передачей информации ИРПР. При помощи этих интерфейсов подключаются практически все периферийные устройства (дисплеи, печатающие устройства, клавиатуры, пульта, графопостроители и т. п.). Сопряжение малого интерфейса с системной магистралью осуществляется контроллером (К). Внешние запоминающие устройства подключаются, как правило, через специальные интерфейсы, например интерфейс накопителя на гибком магнитном диске ИНГМД.

К третьему уровню сопряжения относятся интерфейсы датчиков (Д) и исполнительных устройств (ИУ), т. е. интерфейсы для их согласования с УСО.

К четвертому уровню сопряжения относятся интерфейсы устройств передачи данных (УПД), т. е. интерфейсы телеграфных, телефонных, высокочастотных, оптоволоконных и других каналов для передачи данных на большие расстояния, в том числе интерфейсы, применяемые для построения локальных, региональных и других типов сетей ЭВМ.

К пятому уровню сопряжения относятся внешние относительно микропроцессорной системы интерфейсы, например системный интерфейс старшей ЭВМ в многомашиной системе, неунифицированный интерфейс объекта управления и т. п. Соединение внешнего интерфейса с системным осуществляется при помощи специального адаптера интерфейсов (А).

Элементная база интерфейсов. В состав МПК БИС различных серий включаются ИМС регистров, буферных каскадов, контроллеров, устройств передачи информации и некоторых других функциональных устройств, предназначенных для организации непрограммируемых и программируемых интерфейсов. Функции непрограммируемых интерфейсов не изменяются в процессе работы микропроцессорных систем. Программируемые интерфейсы могут перестраиваться под программным управлением микропроцессора с выполнения одной функции на другую, благодаря чему обеспечивается более гибкая организация МПСУ.

Рассмотрим принципы построения и применения некоторых интерфейсных БИС и СИС различных серий.

Шинные формирователи (ШФ) обеспечивают развязку входов и выходов устройств, работающих на двунаправленную магистраль, и повышают нагрузочную способность магистрали. Структурная схема и графическое обозначение шинного формирователя, выполненного в виде интегральной микросхемы К589АП16, представлены на рис. 2.8.

Шинный формирователь включает в свой состав две группы ключей (К) и управляющую логику, причем каждый ключ имеет два входа — управляющий и информационный — и один выход. На управляющие входы первой группы ключей подается сигнал У1, на управляющие входы второй группы ключей — сигнал У2. Если

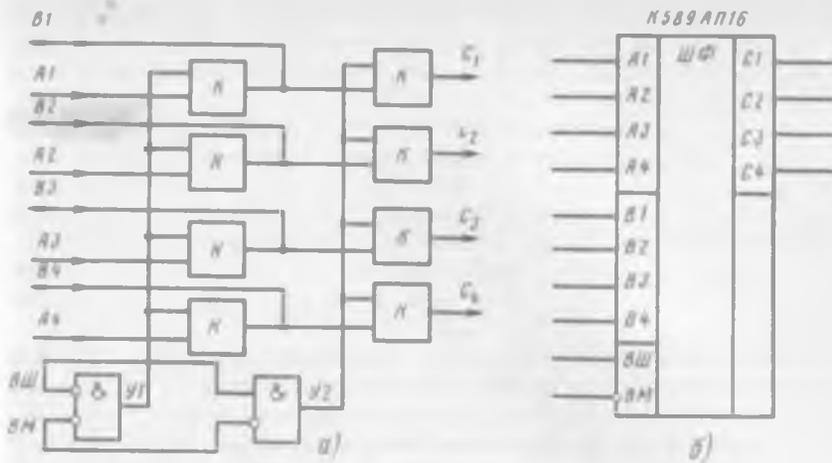


Рис. 2.8. Шинный формирователь К589АП16:

а) схема; б) графическое обозначение

сигнал на управляющем входе какого-либо ключа имеет уровень логического «0», то ключ закрыт, т. е. находится в пассивном состоянии с высоким выходным сопротивлением. Если на управляющий вход ключа подается уровень логической «1», то сигналы на информационном входе и выходе ключа имеют одинаковые логические уровни (активное состояние ключа).

В шинном формирователе предусмотрены три группы *A*, *B*, *C* информационных входов и выходов, причем каждая группа входов и выходов соединена с четырьмя линиями связи, образующими четырехразрядную шину.

Сигналы на управляющих входах *BШ* и *ВМ* шинного формирователя управляют выбором шины (направлением передачи данных) и микросхемы соответственно.

Логические выражения, определяющие состояния ключей ШФ, имеют следующий вид: $У1 = ВМ \wedge ВШ$; $У2 = ВМ \wedge \bar{ВШ}$. Если на вход *ВМ* подается уровень логической «1» ($У1 = 0$, $У2 = 0$), то все ключи закрыты и все входы и выходы ШФ развязаны между собой. Если значения сигналов на входах *ВМ* и *ВШ* равны «0» ($У1 = 1$, $У2 = 0$), то группа входов *A* связана с группой выходов *B*, т. е. осуществляется передача данных в направлении от *A* к *B*, причем выходы группы *C* находятся в состоянии с высоким выходным сопротивлением. Если значение сигнала на входе *ВМ* равно 0, а на входе *ВШ* — 1 ($У1 = 0$, $У2 = 1$), то группа входов *B* связана с группой выводов *C*, т. е. осуществляется передача данных в направлении от *B* к *C*, причем выходы ключей, на входы которых подается сигнал *У1*, находятся в состоянии с высоким выходным сопротивлением.

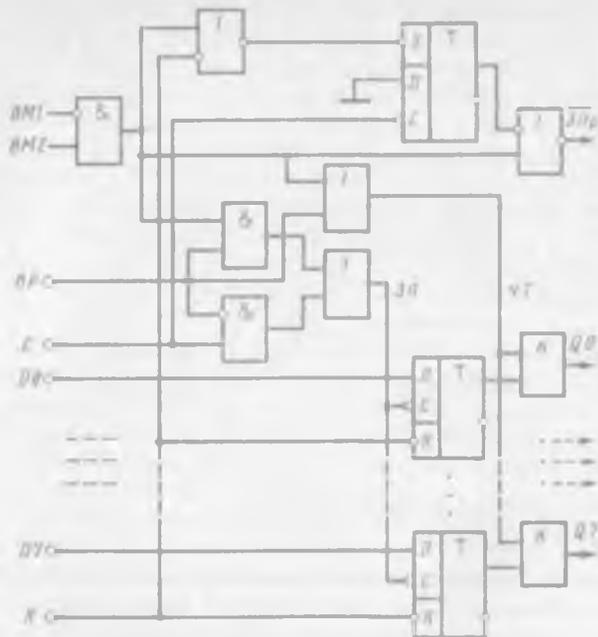


Рис. 2.9. Схема МБР К589ИР12

Таким образом, данные на ШФ могут поступать по четырехразрядным шинам *A* или *B*, а выдаваться по четырехразрядным шинам *B* или *C* соответственно. Выбор направления передачи данных осуществляется с помощью сигнала, подаваемого на вход ВШ.

Микросхема шинного формирователя К589АП26 отличается от вышеописанной только тем, что сигналы на выходах *B* и *C* инвертируются по отношению к сигналам на входах *A* и *B* соответственно.

Многорежимный буферный регистр (МБР) представляет собой универсальный 8-разрядный регистр, выходные каскады которого имеют три устойчивых состояния. Регистр снабжен схемами управления режимами и формирования сигнала запроса на прерывание и предназначен для реализации многих типов интерфейсных и вспомогательных устройств, включая буферные регистры, мультиплексоры, двунаправленные шинные формирователи, прерываемые каналы ввода-вывода и т. д.

Многорежимный буферный регистр (рис. 2.9) состоит из восьми информационных тактируемых *D*-триггеров, восьми выходных ключей (*K*) с тремя устойчивыми состояниями («0», «1», состояние с высоким выходным сопротивлением), *D*-триггера для формирования сигнала запроса на прерывание (ЗПР) и схемы управления режимами

работы триггера. Входные данные поступают на информационные входы $D0 - D7$, а считываются через ключи с выходов $Q0 - Q7$. Многорежимный буферный регистр имеет следующие управляющие входы:

$BM1, BM2$ — входы выбора микросхемы;

BP — вход выбора режима;

C — стробирующий вход;

R — вход установки в состояние «0».

В режиме считывания ключи K передают информацию на выходы $Q0 - Q7$, если выполняется условие

$$ЧТ = BP \vee (\overline{BM1} \wedge \overline{BM2}) = 1,$$

где $ЧТ$ — значение двоичного сигнала на управляющих входах ключей; BP — значение двоичного сигнала на одноименном входе; $BM1, BM2$ — значения двоичных сигналов на одноименных входах; \wedge — операция логического умножения И; \vee — операция логического сложения ИЛИ.

Примечание: $(\overline{BM1} \wedge \overline{BM2}) = 1$ является условием выбора микросхемы (кристалла). Для того чтобы это условие выполнялось, необходимо на вход $BM1$ подать уровень логического «0», а на $BM2$ — уровень логической «1».

Если $ЧТ = 0$, то ключи K находятся в состоянии с высоким выходным сопротивлением, что соответствует отключению МБР от выходной шины, и считывания информации не происходит.

Режим записи информации в МБР осуществляется при выполнении условия

$$ЗП = (C \wedge \overline{BP}) \vee (\overline{BM1} \wedge \overline{BM2} \wedge BP) = 1,$$

где $ЗП$ — значение двоичного сигнала на тактирующих входах D -триггеров; C — значение двоичного сигнала на одноименном входе МБР.

Если на вход C подан уровень логической «1», а на вход BP — уровень логического «0» и условие выбора микросхемы не выполняется, то $(C \wedge \overline{BP}) = 1$, $ЗП = 1$, $ЧТ = 0$, т. е. осуществляется только запись информации без считывания.

При выполнении условия $(\overline{BM1} \wedge \overline{BM2} \wedge BP) = 1$, $BP = 1$, $ЗП = 1$, $ЧТ = 1$ происходит запись информации с одновременным считыванием, т. е. информация с входов $D0 - D7$ передается на выходы $Q0 - Q7$ МБР.

Установка информационных триггеров в состояние «0» обеспечивается входным сигналом $R = 0$. С помощью отдельного D -триггера и управляющей логики в МБР формируется сигнал запроса на прерывание $ЗПр$, активным уровнем которого является уровень логического «0». Условие формирования сигнала $\overline{ЗПр} = 0$:

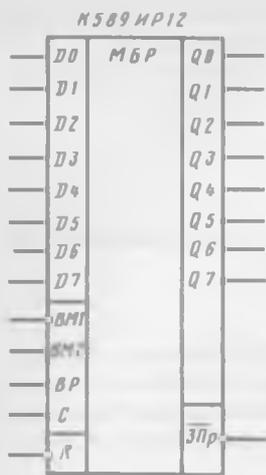


Рис. 2.10. Графическое обозначение многорежимного буферного регистра

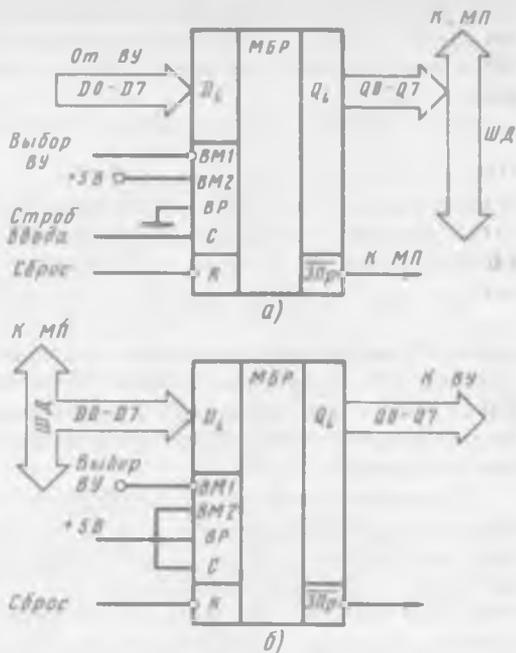


Рис. 2.11. Примеры использования МБР К589ИР12:

а — ввод информации; *б* — вывод информации

$$RC \vee (BM1 \wedge BM2) = 1,$$

которое выполняется либо при выборе микросхемы $(BM1 \wedge BM2) = 1$, либо при $C=1$ и $R=1$. Сброс сигнала запроса на прерывание ($ЗПр=1$) осуществляется при условии

$$\bar{R} \wedge \overline{BM1 \wedge BM2} = 1,$$

которое выполняется, если $R=0$ и $(BM1 \wedge BM2)=0$.

Графическое обозначение многорежимного буферного регистра, выполненного в виде интегральной микросхемы К589ИР12, представлено на рис. 2.10.

Примеры организации интерфейсов в МПСУ. На рис. 2.11 показаны примеры использования многорежимного буферного регистра (К589ИР12) в устройствах ввода—вывода информации.

В режиме ввода информации (рис. 2.11,а) данные от внешнего устройства (ВУ) поступают на информационные входы $D0—D7$. На вход VP подается уровень логического «0», поэтому запись в данных в МБР произойдет только при подаче stroba ввода на вход C ($3P=(C \wedge VP)=1$). При $C=1$ на выходе МБР устанавливается сигнал запроса на прерывание $3Pr=0$. Если микропроцессор выставляет на шину адреса ША код адреса внешнего устройства, с которым связан данный МБР, то на вход $VM1$ с дешифратора адреса подается уровень логического «0». Выполняется условие выбора микросхемы $(VM1 \wedge VM2)=1$. Происходит считывание данных с выходов $Q0—Q7$ МБР. Данные по шине данных ШД поступают в МП. Микропроцессор снимает код адреса ВУ с шины адреса. Выходные каскады МБР переходят в состояние с высоким выходным сопротивлением. Многорежимный буферный регистр отключается от ШД и цикл ввода заканчивается. При записи новых данных цикл ввода повторяется.

В режиме вывода информации (рис. 2.11,б) на вход VP подается уровень логической «1» ($CT=1$), поэтому выходные каскады МБР находятся в активном состоянии, и информация с выходов $Q0—Q7$ постоянно поступает к ВУ. Запись новой информации в МБР осуществляется посредством выбора микросхемы. Для этого МП выставляет на ША код адреса ВУ и с дешифратора адреса на вход $VM1$ поступает уровень логи-

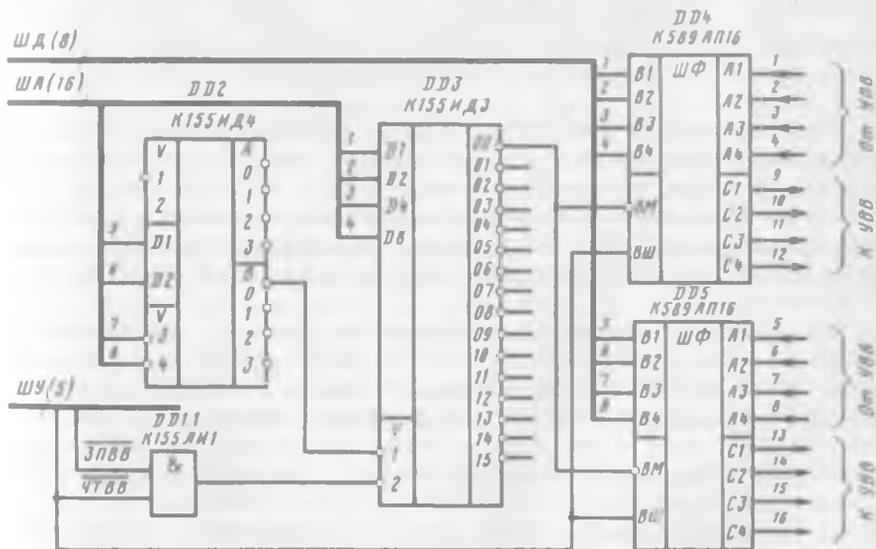


Рис. 2.12. Схема подключения устройств ввода-вывода к системной магистрали И-41

ческого «0» ($\overline{BM1} \wedge \overline{BM2} = 1$). Выполняется условие $ЗП = \overline{BM1} \wedge \overline{BM2} \wedge \overline{BP} = 1$, и информация с ШД поступает на входы $D0—D7$ и заносится в регистр. На этом цикл вывода информации заканчивается. При необходимости вывести новые данные цикл вывода повторяется.

Рассмотрим схему подключения устройств ввода—вывода к системной магистрали И-41 (рис. 2.12). Схема позволяет подключить к магистрали до 64 УВВ. Дешифратор $DD2$ (К155ИД4) служит для выбора дешифратора адреса $DD3$ (К155ИД3). Другие дешифраторы адреса (на схеме не показаны) подключаются к выходам $B1,2,3$ микросхемы $DD2$. Сигналы с дешифратора адреса $DD3$ используются как сигналы BM шестнадцати буферов ввода—вывода информации, в качестве которых используются шинные формирователи ШФ К589АП16. Входные по отношению к микропроцессору сигналы подключаются ко входам $A1—A4$ микросхем $DD4, DD5$, а выходные—к выходам $C1—C4$. Входы—выходы $B1—B4$ этих микросхем подключаются к ШД. Следует заметить, что информация на выходах $C1—C4$ сохраняется лишь во время выдачи сигнала BM , а после его снятия выходы переходят в третье состояние.

2.3. УСТРОЙСТВА СВЯЗИ С ОБЪЕКТОМ

Как правило, устройство связи с объектом выполняется в виде различных модулей, например модуля обмена с оптронной развязкой (МОО), модуля приема аналоговых сигналов (МПА), модуля выдачи дискретных (МВД) и аналоговых (МВА) сигналов и т. п.

Преобразователи напряжения в код с компенсационным интегрированием. Из всех видов АЦП наибольшее распространение имеют преобразователи напряжения в код (ПНК). В микроэлектронике для преобразования аналоговых напряжений, снимаемых с различных датчиков, широко используются интегрирующие ПНК последовательного счета, обеспечивающие высокие помехоустойчивость и точность.

Как правило, на детерминированные сигналы, снимаемые с датчиков, накладываются различного рода шумы или помехи, представляющие собой случайные процессы. В качестве характеристики «зашумленности» сигнала в технике используется отношение сигнал—шум. Если спектральные характеристики сигнала и шума различны, то эффективным способом повышения отношения сигнал—шум является метод аналогового интегрирования сигналов. При реализации этого метода происходит накопление полезного сигнала, а шумы и помехи частично компенсируются.

Интегрирующие ПНК обычно строятся по методу компенсационного интегрирования, впервые предложенного советскими

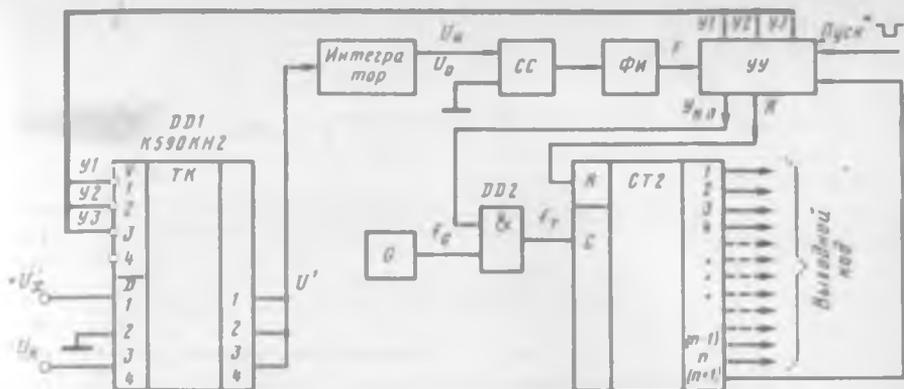


Рис. 2.13. Структурная схема ПНК с компенсационным интегрированием типа «напряжение — временной интервал — код»

инженерами В. Г. Беляковым и Е. В. Добровым в 1960 г. Рассмотрим обобщенную структурную схему ПНК с компенсационным интегрированием типа «напряжение — временной интервал — код» (рис. 2.13).

Преобразователь напряжения в код содержит следующие элементы: коммутатор аналоговых напряжений $DD1$, интегратор, схему сравнения (CC), формирователь импульсов ($ФИ$), устройство управления ($УУ$), генератор импульсов (G), ключ и двоичный счетчик ($СТ2$) с входом установки в состояние «0» (R).

В качестве коммутатора аналоговых напряжений рационально использовать микросхему $K590KH2$, представляющую собой четыре независимых токовых ключа с дискретным управлением (ключ открыт, если на его управляющий вход V подается уровень логического «0»). На управляющие входы ключей поступают сигналы $У1, У2, У3$ с устройства управления. На информационные входы ключей поступают преобразуемое напряжение $+U_x, 0В$ («Земля») и компенсирующее напряжение $-U_x$. Информационные выходы всех ключей объединены и связаны с входом аналогового интегратора, выполненного на операционном усилителе.

Временные диаграммы сигналов в рассматриваемом ПНК представлены на рис. 2.14.

В исходном состоянии открыт ключ 2 ($DD1$). На вход интегратора поступает напряжение $U' = 0В$. Напряжение на выходе интегратора $U_a = U_0$.

В момент времени t_0 на устройство управления поступает сигнал «Пуск». На вход интегратора подается положительное постоянное напряжение $U' = +U_x$. Это напряжение интегрируется в течение фиксированного интервала времени $T_0 = t_1 - t_0 = 2^n \tau$, где n — число разрядов (выходов) счетчика $СТ2$; 2^n — число внутренних состояний этого счетчика; τ — период следования импульсов f_T .

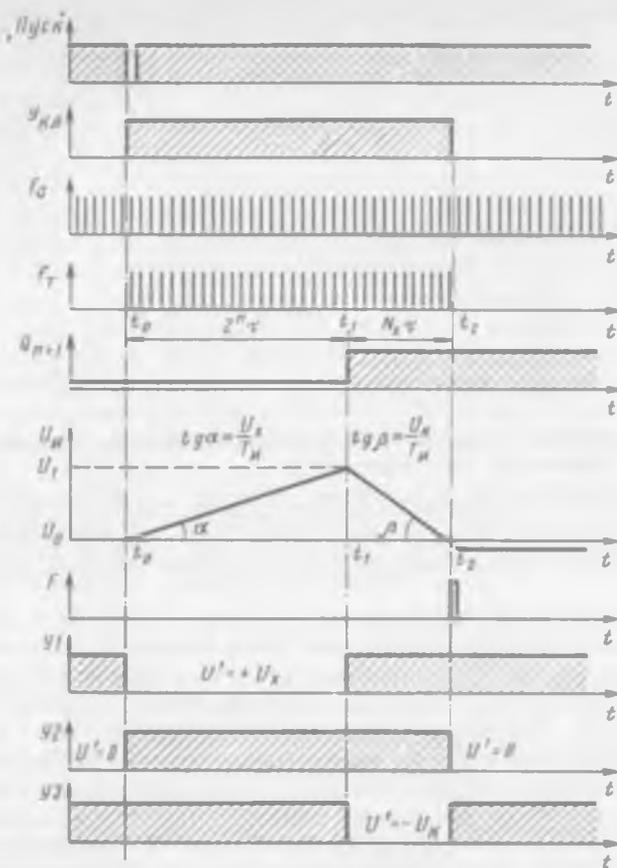


Рис. 2.14. Временные диаграммы сигналов в ПНК с компенсационным интегрированием типа «напряжение — временной интервал — код»

В начале временного интервала T_0 счетчик СТ2 устанавливается в нулевое состояние сигналом, подаваемым на вход R. Одновременно открывается ключ DD2 и на тактовый вход счетчика C поступают импульсы f_T с генератора импульсов G. Конец временного интервала T_0 (момент времени t_1) определяется либо по переполнению счетчика (состоянию, при котором на всех его выходах — логические «1»), либо по переходу «0» в «1» на дополнительном ($n+1$) выходе счетчика.

В момент t_1 на вход интегратора подается отрицательное постоянное напряжение $U' = -U_x$, абсолютное значение которого выбирается заведомо большим, чем абсолютное значение U_x . Это напряжение интегрируется в течение интервала времени $T_x = t_2 - t_1 = N_x \tau$, где N_x — число импульсов, сосчитанных на интервале T_x . При равенстве напряжений U_H и U_0 формирователь

импульсов ФИ формирует импульс F , который поступает на вход УУ и служит для идентификации момента t_2 .

В момент времени t_2 ключ $DD2$ закрывается, а на вход интегратора поступает напряжение $U' = 0$ В. В этот момент заканчивается цикл преобразования. На выходах счетчика СТ2 фиксируется код числа $N_x = \sum_{i=0}^{n-1} 2^i a_i$, где a_i — логический уровень сигнала на i -м выходе счетчика; 2^i — вес разряда счетчика.

Покажем, что число N_x импульсов, сосчитанных на временном интервале T_x , пропорционально измеряемому напряжению U_x . Напряжение на выходе интегратора определяется по формуле

$$U_n = \frac{1}{T_x} \int_{t_0}^t U' dt, \quad (2.1)$$

где T_x — постоянная времени интегратора; t — текущее время ($t \geq t_0$), U' — напряжение на входе интегратора.

Значения напряжений на выходе интегратора в фиксированные моменты времени t_0 , t_1 и t_2 можно определить по (2.1) (табл. 2.2). При $t = t_2$ справедливо равенство

$$U_0 + \frac{1}{T_x} \int_{t_0}^{t_1} U_x dt - \frac{1}{T_x} \int_{t_1}^{t_2} U_x dt = U_0. \quad (2.2)$$

Учитывая, что на интервале интегрирования $U_x = \text{const}$ и $U_n = \text{const}$, получаем

$$U_x(t_1 - t_0) = U_n(t_2 - t_1) \quad \text{или} \quad U_x T_0 = U_n T_x.$$

Подставляя в последнюю формулу $T_0 = 2^n \tau$ и $T_x = N_x \tau$, находим

$$U_x = \frac{U_n}{2^n} N_x = \frac{U_n}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} 2^i a_i. \quad (2.3)$$

Принцип компенсационного интегрирования используется также при построении ПНК типа «напряжение — частота — код» (рис. 2.15, а), главная составная часть которого — преобразователь напряжения в частоту (ПНЧ) представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования частоты.

Таблица 2. 2. Формулы для определения напряжений на выходе интегратора

t	U_n
t_0	U_0
$t_1 = t_0 + 2^n \tau$	$U_0 + \frac{1}{T_x} \int_{t_0}^{t_1} U_x dt = U_1$
$t_2 = t_1 + N_x \tau$	$U_1 - \frac{1}{T_x} \int_{t_1}^{t_2} U_x dt = U_0$

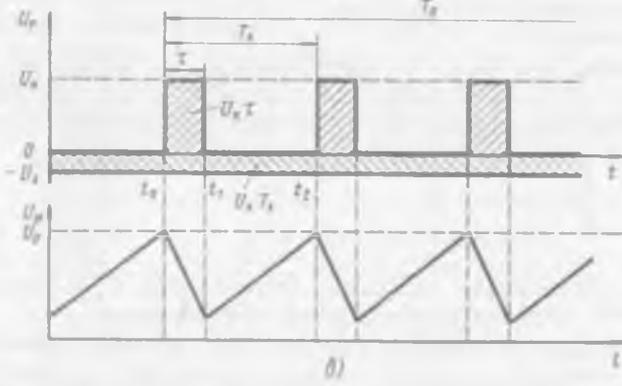
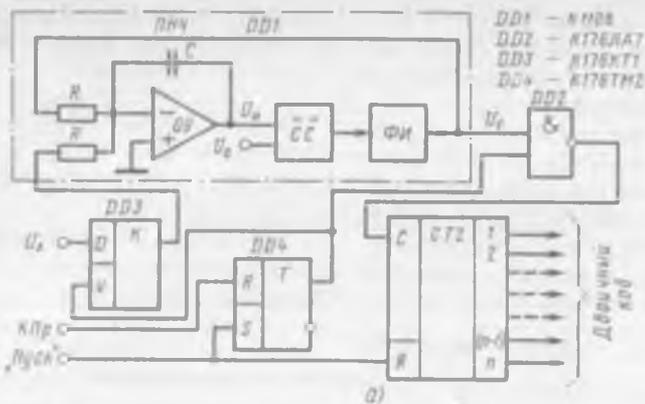


Рис. 2.15. Преобразователь напряжения в код с компенсационным интегрированием типа «напряжение — частота — код»:

a — структурная схема ПНК, *б* — временные диаграммы сигналов ПНК

Постоянное напряжение U_x через аналоговый ключ $DD3$ поступает на вход интегратора, выполненного на операционном усилителе (ОУ), на второй вход которого поступает импульсное напряжение U_f с выхода ПНЧ.

Напряжение U_u с выхода интегратора поступает на вход схемы сравнения (СС), на второй вход которой подается опорное напряжение U_0 . В момент равенства напряжений U_u и U_0 на выходе формирователя импульсов (ФИ) формируется импульс U_f с амплитудой U_x , длительность которого постоянна и равна τ .

Кроме ПНЧ, выполненного на базе интегральной микросхемы $DD1$, схема ПНК содержит ключи $DD2$ и $DD3$, RS-триггер и двоичный счетчик СТ2, с помощью которого реализуется преобразование частоты в код.

При подаче импульса «Пуск», который соответствует началу временного интервала T_0 , счетчик СТ2 устанавливается в состоя-

ние «0», а триггер $DD4$ — в состояние «1», в результате чего открываются ключи $DD2$ и $DD3$. На вход интегратора поступает напряжение U_x , а на вход счетчика — импульсы U_f .

При подаче импульса КПр (конец преобразования), соответствующего концу временного интервала T_0 , триггер $DD4$ устанавливается в состояние «0», закрываются ключи $DD2$, $DD3$ и на выходе счетчика фиксируется двоичный код, пропорциональный преобразуемому напряжению U_x .

Рассмотрим (рис. 2.15, б), как изменяется напряжение на выходе интегратора в течение временного интервала T_x (периода следования импульсов U_f). В течение времени t на суммирующие входы интегратора поступают напряжения U_x и U_x , противоположные по знаку. Причем значение U_x выбрано таким, что $|U_x| \geq |U_{x\max}|$, где $|U_x|$ — абсолютное значение напряжения U_x ; $|U_{x\max}|$ — максимальное абсолютное значение напряжения U_x .

На интервале времени $t_1 - t_0$ полярность напряжения на инверсном входе ОУ определяется полярностью U_x , а на интервале $t_2 - t_1$ — полярностью U_x . Поэтому в течение времени t напряжение на выходе интегратора линейно убывает, а в течение времени $(T_x - t)$ линейно возрастает. По аналогии с (2.2) получаем

$$U_0 + \frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} U_x dt - \frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} U_x dt = U_0 \quad (2.4)$$

Учитывая, что $U_x = \text{const}$ и $U_x = \text{const}$,

$$U_x T_x = U_x \tau.$$

Отсюда с использованием формулы (2.4) получаем

$$U_x = U_x \tau \frac{1}{T_x} = U_x \tau f_x,$$

где f_x — частота следования импульсов U_f . Число импульсов, сосчитанных на интервале T_0 , равно

$$N = T_0 f_x \text{ и } f_x = N / T_0.$$

Используя последние формулы, находим

$$U_x = U_x \tau \frac{N}{T_0} = U_x \tau \sum_{i=0}^{N-1} 2^i a_i \quad (2.5)$$

Отметим свойства ПНК с компенсационным интегрированием:

1. Код на выходе ПНК пропорционален входному напряжению U_x .

2. В результирующих формулах (2.3) и (2.5) отсутствует член T_n , поэтому медленные вариации эквивалентной постоянной времени T_n не сказываются на точности преобразования, если T_n не изменяется в течение интервала времени T_0 .

3. Медленный дрейф напряжений U_m и U_0 не влияет на результат преобразования, так как в данном случае важна лишь кратковременная стабильность этих напряжений в течение интервала времени T_0 .

4. В интегрирующих ПНК уменьшается влияние всех видов помех. Помехи с частотой питающей сети будут полностью подавляться, если выбрать время интегрирования T_0 входного напряжения U_x равным периоду питающей сети T_c . Чтобы обеспечить это условие, осуществляется подстройка частоты генератора импульсов G под частоту питающей сети.

5. Время полного цикла преобразования достаточно велико и составляет несколько десятков миллисекунд.

Преобразователи напряжения в код с компенсационным интегрированием используются, как правило, для преобразования постоянных или медленно изменяющихся напряжений, получаемых от высокочувствительных датчиков температуры или расхода. Относительная погрешность преобразования этих ПНК не превосходит 0,1%.

Пример построения УСО на базе АЦП с компенсационным интегрированием. На рис. 2.16 представлена структурная схема 12-разрядного АЦП с компенсационным интегрированием типа «напряжение — временной интервал — код», предназначенного для преобразования в код напряжений произвольной полярности и величины. Аналого-цифровой преобразователь включает в свой состав: интегратор $DA1$; компаратор $DA2$; формирователь импульсов Φ , формирующий положительные импульсы по переходам выходного сигнала компаратора из состояния «0» в состояние «1» или из состояния «1» в состояние «0»; схему управления, состоящую

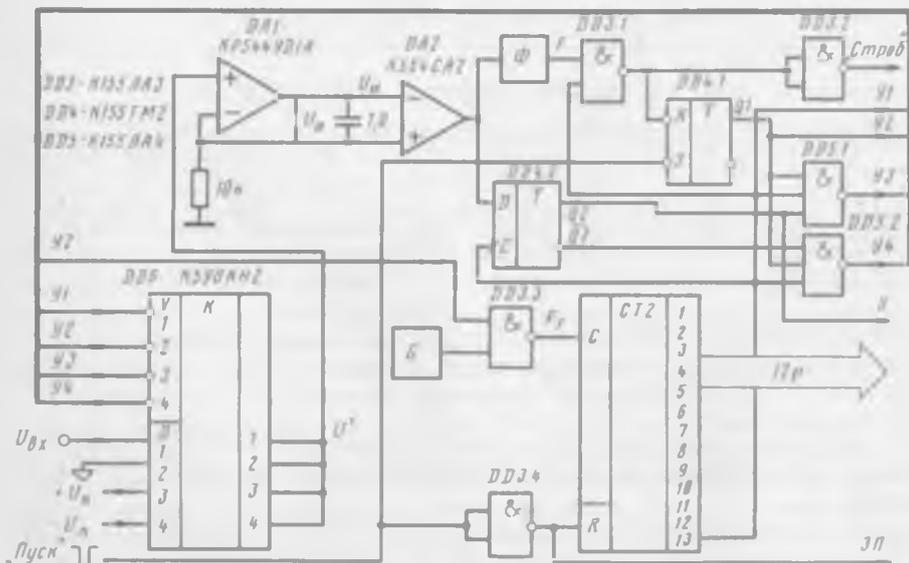


Рис. 2.16. Структурная схема 12-разрядного АЦП с компенсационным интегрированием типа «напряжение — временной интервал — код»

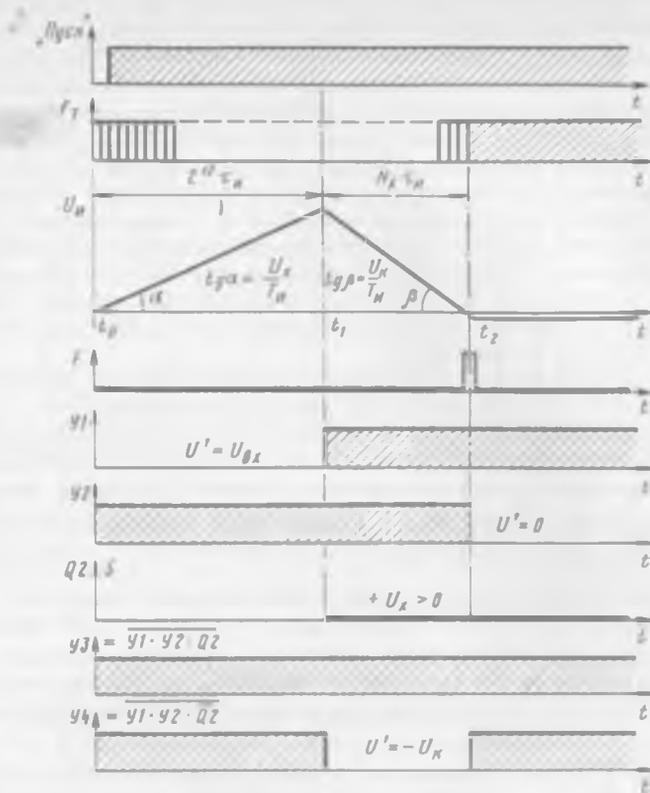


Рис. 2.17. Временные диаграммы сигналов АЦП

из RS-триггера DD4.1, тактируемого D-триггера DD4.2, логических элементов DD3 и DD5; коммутатор аналоговых напряжений DD6; генератор импульсов (ГИ) и 13-разрядный двоичный счетчик СТ2.

На входы АЦП подаются следующие сигналы:

измеряемое постоянное напряжение $U_x = 0 \dots 10$ В произвольной полярности; 0 В (земля);

компенсирующие напряжения $+U_x$ и $-U_x$;

управляющий сигнал «Пуск» (импульс отрицательной полярности).

С выходов АЦП поступают следующие сигналы:

«Строб», используемый для записи выходного кода в регистр ввода;

признак знака S;

12-разрядный выходной код;

сигнал записи ЗП кода номера канала в буферный регистр.

В схеме управления формируются также сигналы $Y1, Y2, Y3, Y4$, используемые для коммутации аналоговых напряжений $U_x, 0В, +U_x, -U_x$ соответственно.

Кроме того, сигнал $Y2$ управляет состоянием ключа DD3.3.

Рассмотрим работу этого АЦП (рис. 2.17). С приходом внешнего управляющего сигнала «Пуск» (в момент времени t_0) RS-триггер DD4.1 устанавливается в

состояние «1» и открывается ключ $DD3.3$, через который на тактовый вход счетчика $CT2$ поступают импульсы f_1 . Этот же сигнал «Пуск» через инвертор $DD3.4$ подается на вход R счетчика и устанавливает его в состояние «0», после чего счетчик работает в режиме суммирования. Уровнем логического «0», снимаемым с самого старшего разряда счетчика (сигнал $Y1$), открывается ключ 1 коммутатора $DD6$ и на вход интегратора $DA1$ поступает напряжение U_x произвольной полярности. Сигнал с выхода интегратора поступает на вход компаратора $DA2$, сигнал на выходе которого имеет уровень логического «0», если полярность напряжения U_n — положительная, и уровень логической «1», если полярность U_n — отрицательная. Заметим, что в режиме интегрирования напряжения U_x полярность его совпадает с полярностью напряжения U_n .

При изменении сигнала $Y1$ происходит запись значения признака знака S в триггер $DD4.2$ и в зависимости от этого значения один из сигналов $Y3$ или $Y4$ принимает уровень логического «0».

Если в момент времени t_1 полярность напряжений U_x и U_n положительная ($S = Q_2 = 0$), то $Y4 = 0$, и на вход интегратора поступает напряжение $U' = -U_x$ отрицательной полярности; если же полярность напряжений U_x и U_n отрицательная, то $Y3 = 0$, и на вход интегратора поступает напряжение $U' = +U_x$ положительной полярности.

В момент времени t_2 , когда полярность напряжения U_n на выходе интегратора изменится, на выходе формирователя ФИ появляется импульс F положительной полярности. При этом RS -триггер $DD4.1$ устанавливается в состояние «0», ключ $DD3.3$ закрывается и счетчик $CT2$ переходит в режим хранения информации. В этот же момент времени на вход интегратора подается напряжение $U' = 0В$.

На этом цикл преобразования заканчивается. На выходе АЦП фиксируется 12-разрядный код, пропорциональный значению U_x , и признак знака S .

На рис. 2.18 представлена схема подключения УСО к системной магистрали И-41. Устройство связи с объектом включает коммутатор каналов K (мультиплекс-

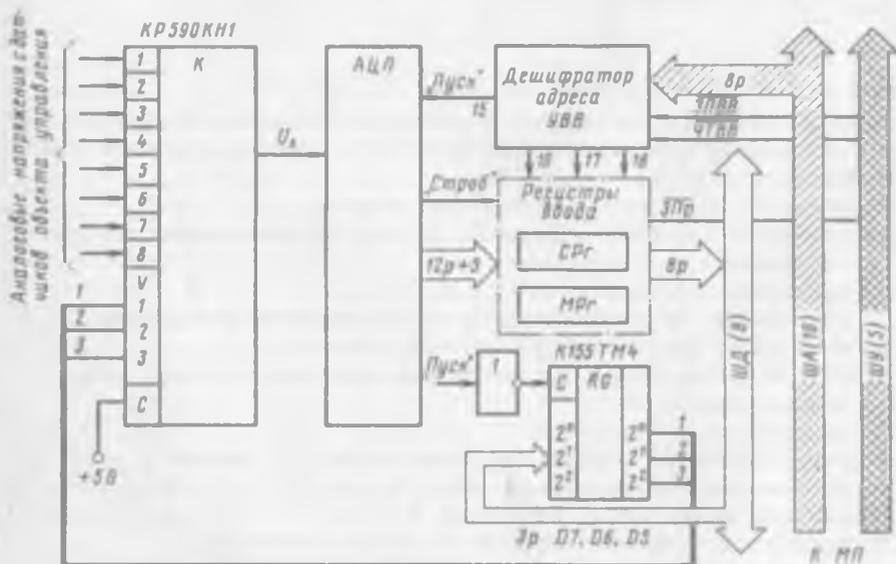


Рис. 2.18. Схема подключения УСО к магистрали И-41

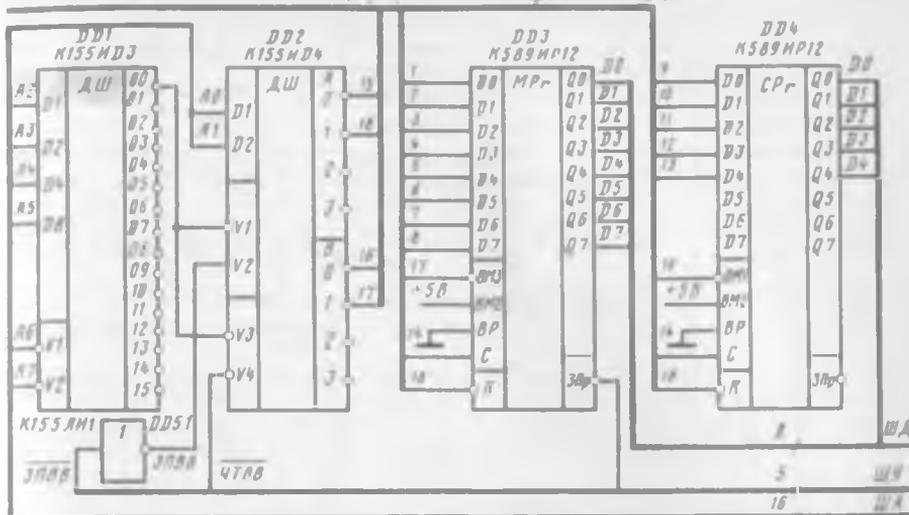


Рис. 2.19. Схема подключения дешифраторов и регистров ввода УСО к системной магистрали И-41

сор), 12-разрядный АЦП (см. рис. 2.16) и интерфейс на базе дешифратора адреса УВВ, двух регистров ввода СРг (регистра старшего байта) и МРг (регистра вывода номера канала RГ). Схема подключения дешифраторов адресов УВВ и регистров ввода СРг и МРг к системной магистрали И-41 показана на рис. 2.19.

Для адресации внешних устройств используются восемь младших разрядов (A7-A0) шины адреса ША. Шесть из них (A7-A2) подсоединяются к входам дешифратора DD1, который позволяет подключить и осуществить выбор до 16 УСО. Дешифратор DD2 строится выходным сигналом с дешифратора DD1 и служит для дешифрации двух младших адресных разрядов A1 и A0 с целью формирования сигналов «Пуск» (15), «Установка в 0» (18), ВМ (16, 17). Значения входных и выходных сигналов DD2 представлены в табл. 2.3 (при условии, что с выхода DD1 поступает уровень логического «0»). В данном примере предполагается, что код адреса УСО равен A7 A6 A5 A4 A3 A2 A1 A0 = 000000XX, где X — произвольное значение («1» или «0») сигнала.

Преобразователь напряжения в код поразрядного уравнивания. Рассмотрим принцип действия широко распространенного преобразователя поразрядного уравнивания (рис. 2.20, а).

Входное напряжение U_x поступает на один из входов схемы сравнения СС, на второй вход которой с выхода преобразователя кода в напряжение (ПКН) подается сумма эталонных напряжений $U_{пкн}$, соответствующая определенному двоичному коду. Дискретный сигнал с выхода схемы сравнения поступает на вход регистра последовательного приближения (РПП), на другие входы которого подаются тактовые импульсы (ТИ) с генератора импульсов G и сигнал «Пуск», соответствующий началу цикла преобразования.

Таблица 2.3. Таблица функционирования дешифратора D12

Информационные входы		Управляющие входы		Выходы	Примечание
D2 (A1)	D1 (A0)	$\overline{V1}$	V2	Группа А	
				0 1 2 3	
0	0	0	1	0 1 1 1	Сигнал «Пуск». Запись кода в RG
0	1	0	1	1 0 1 1	Установка в состояние «0» СРг и МРг
1	0	0	1	1 1 0 1	
1	1	0	1	1 1 1 0	
D2 (A1)	D1 (A0)	$\overline{V3}$	$\overline{V4}$	Группа В	
				0 1 2 3	
				$\overline{ЧТВВ}$ $\overline{ВМ}$ $\overline{ВМ}$	
0	0	0	0	0 1 1 1	Чтение СРг
0	1	0	0	1 0 1 1	Чтение МРг
1	0	0	0	1 1 0 1	
1	1	0	0	1 1 1 0	

Выходы РПП являются выходами ПКН. Число информационных выходов ПКН соответствует числу разрядов двоичного кода. Кроме этого, РПП формирует сигнал конца преобразования КПр, соответствующий концу цикла преобразования.

На рис. 2.20, б представлены временные диаграммы сигналов четырехразрядного ПКН последовательного приближения (поразрядного уравнивания). Преобразование напряжения в код начинается с приходом сигнала «Пуск». При этом на выходе старшего разряда РПП устанавливается «1», на остальных выходах — «0», т. е. $a_3=1$, $a_2=a_1=a_0=0$ и двоичный код $a_3a_2a_1a_0=1000$. С приходом каждого тактового импульса ТИ устанавливается «1» в следующем по старшинству разряде ($a_i=1$),

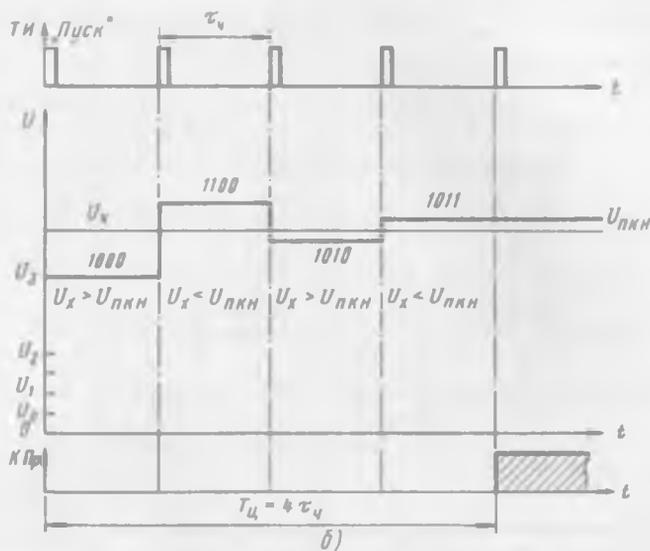
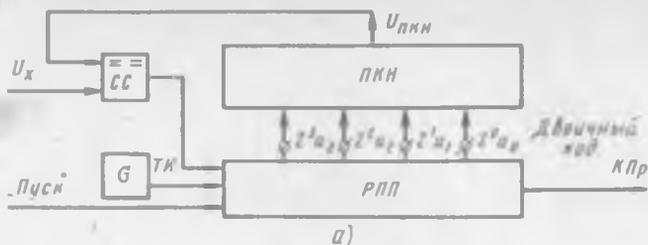


Рис. 2.20. Преобразователь «напряжение — код» поразрядного уравнивания: а — обобщенная структурная схема, б — временные диаграммы сигналов

а значение ближайшего более старшего разряда a_{i+1} кода зависит от результата сравнения напряжений U_x и $U_{ПКН}$ и выбирается равным:

$$a_{i+1} = \begin{cases} 1, & \text{если } U_x \geq U_{ПКН}; \\ 0, & \text{если } U_x < U_{ПКН}. \end{cases} \quad (2.6)$$

В конце преобразования ровно через n тактов, где n — число разрядов двоичного кода, регистр последовательного приближения свою работу заканчивает. На выходе РПП появляется сигнал $КПр=1$, а напряжение U_x уравнивается напряжением $U_{ПКН}$:

$$U_x \approx U_{ПКН} = \sum_{i=0}^{n-1} 2^i a_i U_0 = U_0 \sum_{i=0}^{n-1} 2^i a_i, \quad (2.7)$$

где U_0 — напряжение, соответствующее младшему разряду кода; a_i — значение «0» или «1» i -го разряда двоичного кода; 2^i — вес i -го разряда двоичного кода.

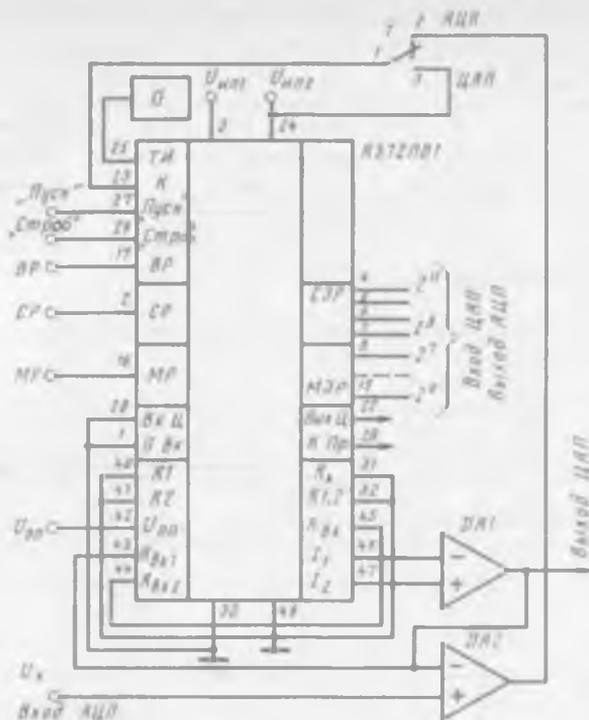


Рис. 2.21. Цифроаналоговый и аналого-цифровой преобразователи поразрядного уравнивания на основе БИС К572ПВ1:

ГИ — генератор импульсов; Т — тумблер (кнопка);

DA1 — операционный усилитель типа 154УД3, К574УД1, К544УД2; DA2 — компаратор напряжений типа 521СА3

На выходах ПКН фиксируется двоичный код, пропорциональный входному напряжению U_x .

При подаче нового сигнала «Пуск» цикл преобразования повторяется. Время цикла преобразования определяется по формуле

$$T_{ц} = n\tau_n, \quad (2.8)$$

где n — число разрядов ПКН; τ_n — период следования тактовых импульсов.

Аналого-цифровой преобразователь поразрядного уравнивания на основе БИС К572ПВ1. На рис. 2.21 представлена структурная схема маломощного 12-разрядного ЦАП и АЦП поразрядного уравнивания, которая включает в свой состав:

АЦП поразрядного уравнивания (совместно с внешним усилителем и компаратором) с выводом параллельного двоичного кода;

умножающий ЦАП совместно с внешним усилителем; байтовый параллельный интерфейс для согласования с 8-разрядной шиной данных.

Назначение выводов БИС К572ПВ1 приведено в табл. 2.4. Функции, выполняемые микросхемой К572ПВ1, сведены в табл. 2.5.

Схема подключения дешифраторов и АЦП К572ПВ1 (в составе УСО) к системной магистрали И-41 представлена на рис. 2.22.

Таблица 2.4. Назначение выводов БИС К572ПВ1

Номер вывода	Обозначение	Назначение вывода
1	П вх	Вход занесения последовательного кода
2	СР	Вход управления четырьмя старшими разрядами кода
3	$U_{\text{ипп}}$	Напряжение питания $U_{\text{ипп}} = +5 \text{ В}$
4—15	$2^{11} - 2^0$	12-разрядный двоичный код (входы — выходы)
16	МР	Вход управления восьмью младшими разрядами кода
17	ВР	Вход выбора режима

К АЦП К572ПВ1

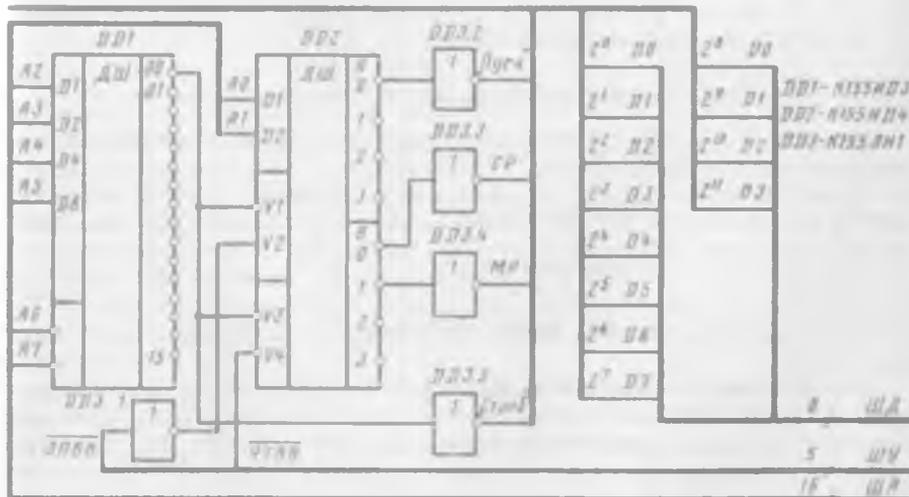


Рис. 2.22. Схема подключения дешифраторов и АЦП К572ПВ1 к системной магистрали И-41

Номер вывода	Обозначение	Назначение вывода
22	Вых. Ц	Выход цикла. Используется в режиме однократного запуска
23	К	Вход сигнала с компаратора
24	$U_{ип2}$	Напряжение питания $U_{ип2} = +15$ В
25	ТИ	Вход тактовых импульсов
26	КПр	Выход сигнала «Конец преобразования»
27	«Пуск»	Вход сигнала «Пуск»
28	Вх Ц	Вход цикла. В режиме однократного запуска соединяется с выходом «Цикл»
29	Стр.	Вход строба (выбора микросхемы)
30	⊥	Земля
31	R_1	Конечный вывод матрицы $R-2R$
32	$R1, 2$	Общий вывод резисторов $R1$ и $R2$
40	$R1$	Вывод резистора $R1$
41	$R2$	Вывод резистора $R2$
42	$U_{оп}$	Опорное напряжение $U_{оп} = -10$ В
43	$R_{ан1}$	Аналоговый вход 1
44	$R_{ан2}$	Аналоговый вход 2
45	$R_{ан}$	Общий вывод резисторов $R_{ан1}$ и $R_{ан2}$
46	I_1	Аналоговый выход 1
47	I_2	Аналоговый выход 2
48	⊥	Аналоговая земля

Таблица 2.5. Функции, выполняемые интегральной микросхемой K572ПВ1

Управляющие входы				Выполняемая функция	
«Строб»	ВР	СР	МР		
1	0	1	1	Все выходы АЦП находятся в активном состоянии	АЦП
		1	0	Выходы старших четырех разрядов — в активном состоянии. Младшие разряды отключены	
		0	1	Старшие разряды отключены. Выходы младших восьми разрядов — в активном состоянии	
		0	0	Выходы всех разрядов отключены	
1	1	1	1	Во внутренний регистр ЦАП записывается 12-разрядный двоичный код	ЦАП
		1	0	Во внутренний регистр ЦАП записываются четыре старших разряда кода	
		0	1	Во внутренний регистр ЦАП записываются восемь младших разрядов кода	
		0	0	Записи кода не происходит	
0	X	X	X	Хранение двоичного кода в регистре ЦАП	

Примечание: В режиме ЦАП выходы всех разрядов отключены.

Устройство связи с объектом блока управления БУ-3 «Орион-3». Микропроцессорным устройством, позволяющим реализовать большой объем функций управления и строить весьма сложные системы управления за счет развитого УОС является блок управления БУ-3 «Орион-3», который широко применяется в системах управления оборудованием.

В основе построения «Орион-3» использован магистрально-модульный принцип. Структурная схема блока управления БУ-3 представлена на рис. 2.23.

К магистрали МПИ подключаются модули «Орион-3»: центральный процессор M_2 микроЭВМ «Электроника-60М» (1); устройство оперативное запоминающее (2) и устройство постоянное запоминающее (3) объемом 4 К и 16 К 16-разрядных слов соответственно; контроллер связи со считывателем с перфоленты В1 (4); плата и панель управления (5, 6); модуль связи МС-5 (7), обеспечивающий связь с другими устройствами по каналам

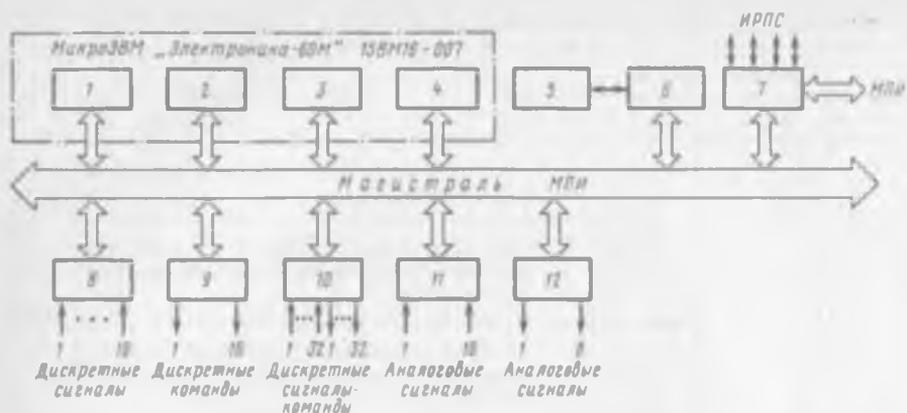


Рис. 2.23. Структурная схема модульного микропроцессорного БУ-3 «Орион-3» ИРПС; модули приема и выдачи дискретных сигналов управления МПД-1 (8), МВД-1(9), МОО-3(10); модули приема и выдачи аналоговых сигналов МПА-4(11), МВА-3(12).

Конструктивно модули выполнены в виде функционально законченных устройств, которые размещаются в соответствующих посадочных местах в корпусе блока управления «Орион-3».

Рассмотрим принцип работы модулей УСО на примере работы модулей приема и выдачи дискретных и аналоговых сигналов.

Модули приема и выдачи дискретных сигналов. Модуль обмена с оптронной развязкой МОО-3 предназначен для приема и выдачи дискретных сигналов управления.

Основные технические характеристики модуля МОО-3:

Число линий приема дискретных сигналов 32

Параметры принимаемых сигналов по каждой линии:

Входное напряжение:

в состоянии «1»

по входу 1, В $24 \pm 4,8$

по входу 2, В 4...5

в состоянии «0»

по входу 1, В, не более 3

по входу 2, В, не более 0,8

Входной ток, мА:

в состоянии «1», не более 20

в состоянии «0», не более 0,2

Максимальная частота обращения к одной и той же линии ввода,

кГц, не более 10

Число выходных каналов 32

Максимальное коммутируемое ключом напряжение, В 32

Максимальный ток нагрузки в состоянии «1» (ключ открыт),

мА 25

Остаточное напряжение на ключе при максимальном токе, В,

не более 0,4

Максимальный ток нагрузки в состоянии «0» (ключ закрыт),

мА 0,1

Максимальная частота переключения при максимальном токе на-

грузки, кГц 10

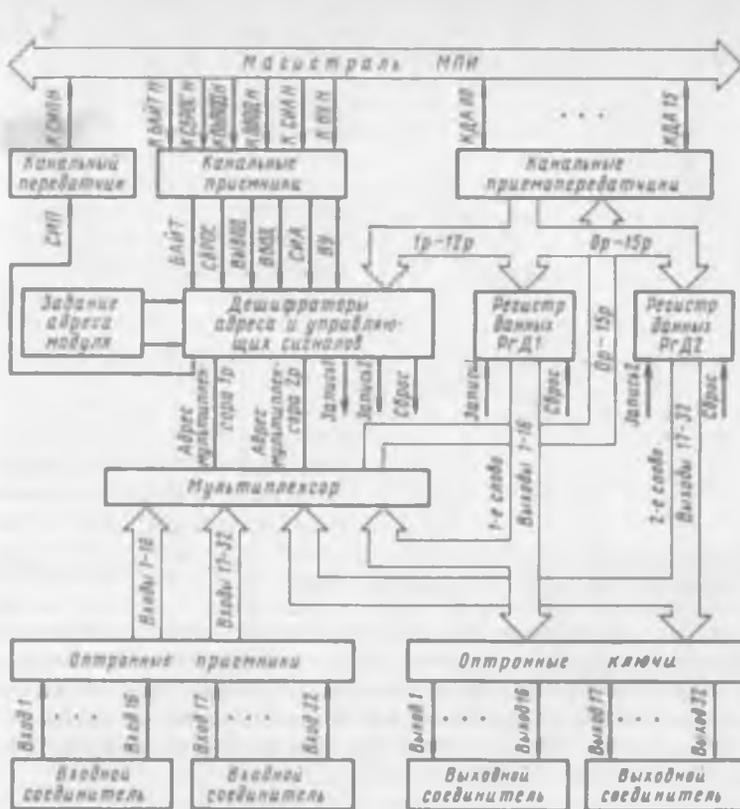


Рис. 2.24. Функциональная схема МОО-3

Функциональная схема модуля МОО-3 приведена на рис. 2.24.

Модуль состоит из следующих основных узлов: канальных приемопередатчиков; дешифраторов адресов и управляющих сигналов; регистров данных РгД1, РгД2; мультиплексора; оптронных приемников и ключей; входных и выходных соединителей (разъемов).

Возможны три режима работы модуля МОО-3: прием входных сигналов; выдача управляющих воздействий; контроль.

Прием входных сигналов и выдача управляющих воздействий (коммутация ключей) осуществляются в режиме стандартного обращения микроЭВМ к внешним устройствам при выдаче управляющих сигналов: ВУ, СИА, ВВОД, ВЫВОД, БАЙТ, СБРОС.

На рис. 2.25 приведен формат адресного слова модулей УСО «Орион-3». Разряды адресного слова 0...2 отведены для обращения к внутренним узлам модулей (регистрам состояний РгС, данных РгД входных и выходных цепей) и коммутации мультиплексора.

Разряды
адресного
слова

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Внешний адрес модулей УСО	Внутренний адрес модулей
---------------------------	--------------------------

Адрес ВУ							Положение модуля в кювете ВУ-З и расширенные внутренние адреса модулей	Тип модулей			Регистры состояний, данных, входных и выходных цепей, сигналов, мультиплексоров		
1	*	*	*	*	*	*	МДП-1	0	0	0	0	0	0
							МВД-1	0	0	1	0	1	0
							МВА-3	0	1	0	1	0	0
							МПА-4	0	1	1	1	1	0
							МОО-3	1	0	0			
							МС-5	1	1	0			

Рис. 2.25. Формат адресного слова модулей УСО «Орион-3» (адреса устанавливаются с помощью перемычек в диапазоне 160_в — 177_в)

Разряды 3...5 отведены для идентификации типа модуля, а 6...8 учитывают положение модуля УСО в корпусе «Орион-3» (при нескольких однотипных модулях) и позволяют расширить поле внутренних адресов. Разряды адресного слова 9...15 отведены для установки адреса ВУ, к которым относятся и модули УСО в диапазоне адресов с 160_в по 177_в.

В режиме приема на шины ДА (00—15) микроЭВМ через мультиплексор выводятся последовательно два 16-разрядных слова, содержащих информацию по входным сигналам. При выдаче управляющих воздействий информация через каналные приемопередатчики шин ДА (00—15) поступает на регистры данных РгД1, РгД2 и затем на оптронные ключи. Запоминание информации в регистрах проводится по командам «Запись 1» и «Запись 2», которые выдаются дешифратором адреса и управляющих сигналов.

В режиме приема и контроля через мультиплексор в микроЭВМ выдается информация о входных сигналах и о содержании регистров данных РгД1 и РгД2 в соответствии с адресами мультиплексора:

		2P	1P
линии ввода	1—16	0	0
линии ввода	17—32	0	1
линии вывода	1—16	1	0
линии вывода	17—32	1	1

Прием, выдача и контроль информации производятся в модуле МОО-3 за два стандартных обращения к каналу микроЭВМ.

Модуль приема дискретных сигналов МДП-1 отличается от канала приема дискретных сигналов модуля МОО-3 тем, что имеет в своем составе устройство прерывания, которое при изменении значения входного сигнала формирует сигнал требования прерывания (ТПР). Сигнал, который может вызвать прерывание процесса, задается центральным процессором.

Модуль выдачи дискретных сигналов МВД-1 отличается от канала выдачи дискретных сигналов модуля МОО-3 наличием схемы защиты выходной цепи от короткого замыкания. Защита осуществляется путем отключения управления по цепи, в которой возникла перегрузка. Наличие перегрузки по любому выходу вызывает прерывание исполнения программы микроЭВМ. Схема модуля предусматривает повторное включение выходной цепи, по которой возникла перегрузка по току. На рис. 2.26 представлена схема цепи с защитой от перегрузки по току.

По адресу вектора прерывания микроЭВМ переходит на программу обслуживания модуля МВД-1, по которой повторяется цикл выдачи управляющей информации (данных). Сброс регистра перегрузки по току РгКЗ производится при наличии сигналов ЗАПИСЬ и СБРОС. Если короткое замыкание устранено, модуль МВД-1 продолжает нормально функционировать после повторного включения. Если же короткое замыкание не устранено, то дальнейшие действия по данному каналу управления должны быть предусмотрены управляющей программой микроЭВМ.

Модуль приема аналоговых сигналов. Модуль приема аналоговых сигналов МПА-4 служит для преобразования гальванически развязанных от канала ЭВМ аналоговых сигналов, поступающих от внешних устройств, в цифровой код.

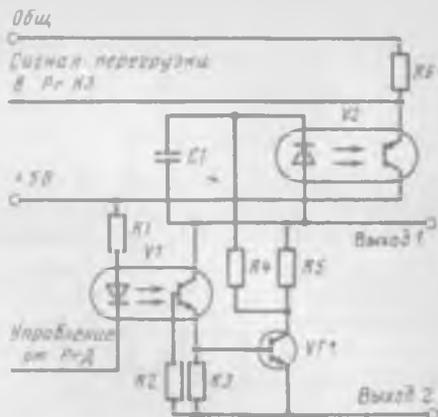


Рис 2.26. Схема защиты от перегрузки по току

Основные технические характеристики модуля МПА-4:

Число входных сигналов	16
Пределы изменения входных сигналов, В	0...10
Основная погрешность преобразования, мВ	±10
Максимальное время преобразования, мс	1
Входное сопротивление, МОм, не менее	1
Максимальный потребляемый ток от источников постоянного напряжения ($5 \pm 0,25$ В), А, не более	3,2



Рис. 2.28. Формат слова регистра РПП

На рис. 2.28 приведен формат слова регистра РПП.

2. Регистр состояний РгС хранит адреса одного из 16 входных каналов, а также адреса контрольных напряжений. На рис. 2.29 приведен формат слова регистра состояний.

3. Аналоговый мультиплексор обеспечивает подключение к входу компаратора напряжений каждого из 16 аналоговых сигналов и контрольных напряжений $U_{к1}$ и $U_{к2}$. Управление мультиплексором производится от микроЭВМ. Аналоговый мультиплексор построен на микросхемах КР590КН6.

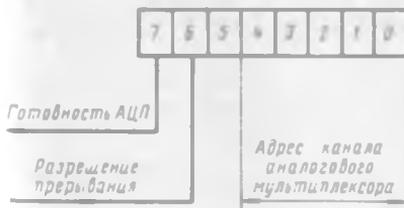
4. Двенадцатиразрядный ЦАП, компаратор напряжений, регистр последовательных приближений РПП, а также источник опорного напряжения и преобразователь постоянного напряжения образуют АЦП с последовательным уравниванием. Цифровой код с выхода РПП после окончания преобразования поступает через канальные приемопередатчики в микроЭВМ.

5. Формирователь контрольных напряжений предназначен для выдачи контрольных напряжений $U_{к1} = 10\,000 \pm 0,5$ мВ и $U_{к2} = 40 \pm 0,5$ мВ с целью точной настройки выходного напряжения ЦАП.

6. Оптронная развязка обеспечивает гальваническую развязку канала микроЭВМ от внешних цепей.

Модуль МПА-4 работает в двух режимах: приема аналоговой информации и контроля содержания регистра состояний РгС.

Режим приема информации начинается со стандартного обращения микроЭВМ к модулю через магистраль МПИ выдачей сигналов ВУ, СИА и ВВОД. По цепям ДА (00—15) в модуль выдается адрес модуля с указанием адреса РгС. Дешифратор адреса и управляющих сигналов формирует сигнал «Запись РгС», который подается на РгС. По цепям ДА (00—15) микроЭВМ



а)

Вход модуля МПА-4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Адрес канала	10	11	12	13	14	15	16	17	20

Вход модуля МПА-4	10	11	12	13	14	15	16	40	10
Адрес канала	21	22	23	24	25	26	27	00	06
								мВ	В

б)

Рис. 2.29. Формат слова регистра состояний РгС модуля МПА-4:

а — общий формат слова, б — адреса каналов аналогового мультиплексора (в восьмеричном коде)

выдает данные о коммутации аналогового мультиплексора, которые запоминаются в РгС. При каждом обращении к РгС в дешифраторе формируется сигнал «Запуск АЦП» (начало преобразований), который подается на РПП.

Дальнейшая работа микроЭВМ с модулем МПА-4 может производиться в двух режимах: ожидания сигнала «Готовность АЦП» и «Разрешение прерывания». При работе в первом режиме микроЭВМ при обращении к РгС будет следить за информацией в седьмом разряде слова регистра состояний. При появлении в этом разряде единицы, что говорит об окончании режима преобразования в АЦП, микроЭВМ, выдавая сигналы ВУ, ВВОД, СИА, обращается к модулю МПА-4 по адресу РПП. При формировании сигнала «Чтение» содержимое РПП поступает на каналные приемопередатчики цепей ДА (00—15). В этом режиме микроЭВМ должна постоянно работать с модулями МПА-4, ожидая сигнала «Готовность АЦП».

В режиме работы по прерыванию микроЭВМ, записав в РгС адрес канала, по которому необходимо считать информацию, и единицу в шестом разряде («Разрешение прерывания»), может перейти на работу по другой программе, ожидая приход сигнала ТПР (требования прерывания) от модуля МПА-4. В модуле сигнал ТПР формируется в узле логики прерываний после прихода сигнала «Готовность АЦП». По сигналу ТПР микроЭВМ прерывает программу и выдает сигнал предоставления прерывания ППР1, по которому из схемы логики прерывания в канал МПИ микроЭВМ через цепи «адрес—данные» выдается адрес вектора прерывания (2р—7р). В соответствии с этим вектором микроЭВМ переходит на программу обслуживания модуля МПА-4, считывая из РгД цифровую информацию преобразованного входного сигнала. По окончании цикла считывания информации микроЭВМ выдает сигнал «Сброс», по которому все узлы модуля МПА-4 приходят в исходное состояние.

Модуль выдачи аналоговых сигналов. Модуль выдачи аналоговых сигналов МВА-3 предназначен для выдачи внешним устройством гальванически развязанных от канала ЭВМ аналоговых сигналов.

Основные технические характеристики модуля МВА-3:

Число выходных сигналов	8
Пределы изменения выходных сигналов, В	0...10
Основная погрешность преобразования, мВ	±10
Частота выдачи сигнала по каждому выходу, кГц, не более	10
Минимальное сопротивление нагрузки, кОм	1
Максимальный потребляемый ток от источника постоянного напряжения $5 \pm 0,25$ В, А, не более	1,5

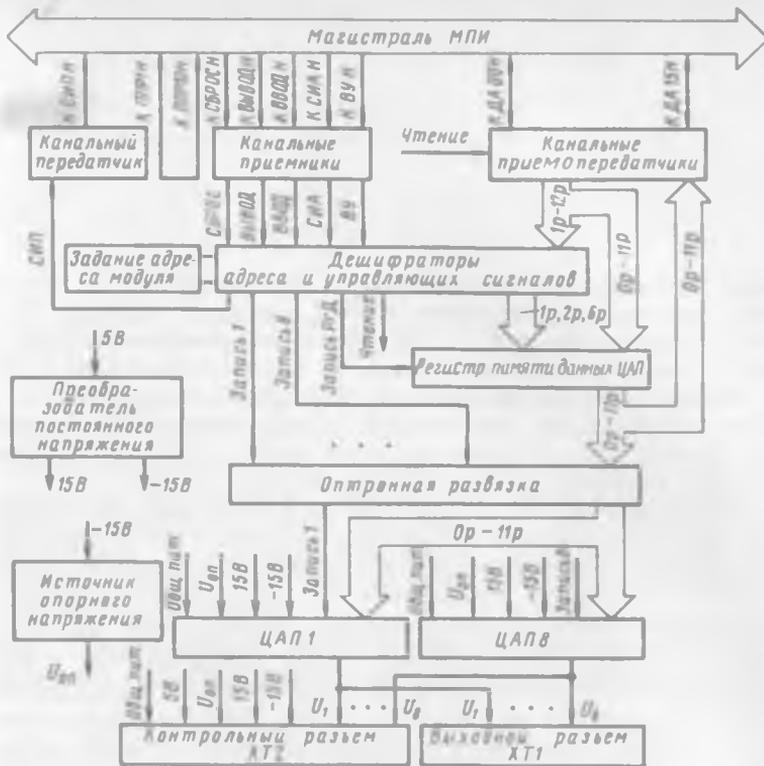


Рис. 2.30. Функциональная схема модуля выдачи аналоговых сигналов МВА-3

Функциональная схема модуля МВА-3 приведена на рис. 2.30.

Модуль содержит следующие основные узлы: каналные приемопередатчики; дешифраторы адреса и управляющих сигналов; регистр памяти данных ЦАП; оптронную развязку; восемь 12-разрядных ЦАП; источник опорного напряжения; преобразователь постоянного напряжения; входные и контрольные соединители (разъемы).

Функции каналных приемопередатчиков дешифраторов адреса и управляющих сигналов, источника опорного напряжения и преобразователя постоянного напряжения модуля МВА-3 аналогичны соответствующим устройствам модуля МВА-4. Регистр памяти данных ЦАП предназначен для запоминания 12-разрядных кодов данных.

Модуль работает в двух режимах: выдачи аналоговых сигналов и контроля выдаваемой информации.

В режиме выдачи аналоговых сигналов микроЭВМ выдает на шину ДА (00—15) адрес модуля, в котором указывается и адрес выбранного канала ЦАП:

		6P	2P	1P
ЦАП	1	0	0	0
ЦАП	2	0	0	1
ЦАП	3	0	1	0
ЦАП	4	0	1	1
ЦАП	5	1	0	0
ЦАП	6	1	0	1
ЦАП	7	1	1	0
ЦАП	8	1	1	1

После дешифрации адреса и его запоминания по команде «Вывод» выдается информация в РгД, сигналы «Запись РгД» и один из сигналов «Запись 1—8». Через оптронную развязку эти сигналы и информация поступают на соответствующий ЦАП, а затем после преобразования — на выходной соединитель. При контроле информации, записанной в РгД, микроЭВМ в режиме «Ввод» производит считывание этой информации, контролируя тем самым исправность состояния модуля МВА-3.

Рассмотренная номенклатура УСО не исчерпывает многообразия этих средств. В конкретных условиях создания микропроцессорных устройств могут быть разработаны самые различные устройства управления приводами постоянного и переменного токов, шаговыми двигателями, тиристорными усилителями и т. п. Но устройства сопряжения с каналом ЭВМ, дешифраторы адреса и управляющих сигналов, устройства прерывания будут общими для всех УСО.

2.4. КОНТРОЛЛЕРЫ

При автоматизации технологического оборудования широко используются устройства локального управления — контроллеры, работающие в реальном масштабе времени под управлением рабочих программ, которые, как правило, размещаются в ПЗУ. Существуют четыре типа контроллеров:

1) программируемые логические (ПЛК), реализующие логические функции и предназначенные для управления последовательностью технологического цикла;

2) программируемые регулирующие (ПРК), реализующие алгоритмы автоматического управления и предназначенные для управления параметрами технологического процесса;

3) программируемые комбинированные (ПКК), предназначенные для управления последовательностью технологического цикла и параметрами технологического процесса;

4) специализированные, реализующие специальные функции управления и предназначенные для управления специальными устройствами технологического оборудования и периферийными устройствами (накопителями на гибком магнитном диске или магнитной ленте, дисплеем, перфоратором и т. д.).



Рис. 2.31. Структурная схема универсального программируемого контроллера

В настоящее время контроллеры строятся на основе микропроцессорных комплектов БИС и по своим характеристикам превосходят релейные схемы управления и аналоговые регуляторы. Например, в системах управления один программируемый контроллер заменяет от 10 до 500 реле, от 4 до 64 одноканальных аналоговых регуляторов.

Основные достоинства программируемых контроллеров заключаются в их высокой надежности, универсальности и гибкости. Универсальность контроллера обеспечивается либо программированием контроллера под определенный технологический процесс с помощью специального встроенного устройства, либо путем замены БИС ППЗУ, в каждой из которых «зашиита» рабочая программа управления определенным технологическим процессом, либо перепрограммированием БИС РПЗУ под конкретный технологический процесс с помощью автономного устройства — программатора. Возможность быстрого внесения различных изменений в систему управления программным путем без изменения аппаратной части обеспечивает большую гибкость МПСУ и значительно сокращает время проектирования системы управления.

Структурная схема программируемого контроллера представлена на рис. 2.31. В состав программируемого контроллера входят: микропроцессор (МП) 1; постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) 2, в котором хранятся программы управления; энергонезависимое оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) 3, в котором хранятся текущие данные, необходимые для реализации программ; пульт управления (ПУ) 4, с помощью которого осуществляется программирование технологического процесса; устройство связи с объектом (УСО) 5; устройство отображения информации о состоянии входных и выходных сигналов параметров процесса (УО) 6; контроллер 7 внешних устройств; контроллер локальной сети (КЛС) 8.

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) работают в циклическом режиме, последовательно выполняя операции ввода данных о состоянии объекта управления, обработки данных и формирования сигналов управления, выдачи сигналов управления на исполнительные устройства. Выходные сигналы управления формируются на основе значений логических функций, вычисляемых по программе, хранящейся в ПЗУ. Вычисленные значения логических функций хранятся в определенной области ОЗУ. После окончания процесса вычисления (обработки) происходит обмен данными между ОЗУ и выходными и входными регистрами УСО. Процессы ввода—вывода, обмена и обработки данных периодически повторяются. Однократное исполнение контроллером всей программы называют циклом полного опроса памяти, а время, в течение которого этот цикл совершается,—временем цикла опроса.

По степени сложности ПЛК разделяются на три класса.

Программируемые логические контроллеры первого класса работают по фиксированной программе. Они имеют небольшое число (5...20) входов и выходов и ЗУ малой емкости. Рабочая программа такого ПЛК обычно «защита» в БИС РПЗУ и не может быть изменена оператором технологической установки. Если нужно изменить алгоритм управления, то БИС РПЗУ отключают от специального контактирующего устройства ПЛК и перепрограммируют с помощью автономного комплекса, программное обеспечение которого содержит язык программирования пользователя, например язык описания релейно-контактных схем на основе булевых функций. Программируемым логическим контроллером такого типа является микроконтроллер МК «Электроника СМС 12101.01»—представитель нового поколения микроЭВМ «Электроника С5». Микроконтроллер содержит на одной плате микропроцессор, ОЗУ и ПЗУ с ограниченным объемом, средства связи с источниками и приемниками информации, средства объединения МК в единую систему (системный канал СК). На рис. 2.32 показана структурная схема ПЛК на базе МК «Электроника СМС 12101.01». В качестве СК использован канал ИРПС и специальный последовательный канал СПК.

Программируемые логические контроллеры второго класса имеют до 150 входов и выходов, ЗУ емкостью до 32 Кбайт, внешний язык задания алгоритмов управления и средства загрузки программ в ЗУ. К программируемым логическим контроллерам этого класса относится контроллер «Электроника К1-20», который обеспечивает логическое управление объектом по 48 линиям связи, а также программируемые прием и выдачу информации в последовательном коде по одному каналу. Четыре входа и выхода контроллера имеют гальваническую развязку.

Логические уровни всех входных и выходных сигналов контроллера соответствуют уровням ТТЛ. Контроллер содержит в

своем составе микропроцессор КР580ИК80. Емкость ОЗУ составляет 1 Кбайт, РПЗУ — 12К байт, ППЗУ — 4К байт. Контроллер не содержит УСО, поэтому пользователю необходимо предусматривать подключение этих устройств.

Программируемый логический контроллер «Электроника К1-20» используется для управления специальным технологическим оборудованием микроэлектроники типа сборочных автоматов, конвейеров и т. п.

Программируемые логические контроллеры третьего класса служат для управления сложными объектами, имеющими до 1000 дискретных входов и выходов. Эти ПЛК сопрягаются с ЭВМ верхнего уровня, имеют развитый язык задания алгоритмов управления, периферийные устройства (дисплей, печатающее устройство, накопитель на гибких магнитных дисках и др.). Кроме управления ПЛК выполняют вычислительные функции и выдают собранную информацию на ЭВМ верхнего уровня. Примерами таких устройств являются контроллеры типа Модикон 584 фирмы GOULD (США), FPC фирмы FESTO и др.

Отечественными устройствами такого типа являются устройства числового программного управления УЧПУ «Электроника 80-31», которые состоят из двух типов микроЭВМ: управляющей для ввода, обработки, отображения, вывода информации и исполнительной для управления исполнительными устройствами оборудования. Универсальная структура микроЭВМ позволяет включать любой набор модулей: вычислитель, устройство отображения, запоминающее устройство, контроллер связи с электроавтоматикой и другими процессорными системами по телеграфным каналам. Модульный принцип УЧПУ позволяет создавать устройства с различными функциональными возможностями. Один из вариантов исполнения УЧПУ «Электроника 80-31» обеспечивает управление объектом с числом дискретных исполнительных механизмов до 100 и дискретных датчиков до 180. Программа управления позволяет задавать цикл функционирования в виде релейно-контактных схем.

Управление объектом выполняется циклически. В течение одного цикла (не более 20 мс) происходит опрос входных сигналов, их логическая обработка и выдача управляющих воздействий. В состав ПЛК входят универсальный вычислитель, блок логических операций, до трех плат электроавтоматики и блок питания. Блок логических операций производит логическую обработку входной битовой информации по программе, записан-

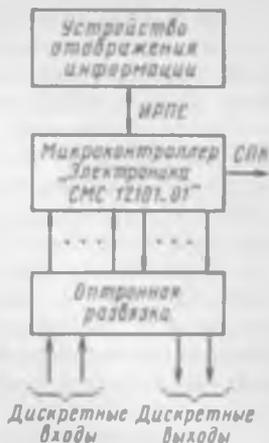


Рис. 2.32. Структурная схема ПЛК на базе микроконтроллера «Электроника СМС 12101.01»

ной в ППЗУ, которая изменяется в зависимости от типа объекта управления. Платы электроавтоматики предназначены для связи с электрооборудованием объекта управления. К одной плате можно подключить 64 входа и 32 выхода.

Подготовка и отладка программ управления электроавтоматикой осуществляются средствами системы подготовки алгоритмов, построенными на базе диалогового вычислительного комплекса ДВК-2М, дополнительно укомплектованного контроллером телеграфных каналов на шесть направлений и программатором ППЗУ. На дисплее системы можно просматривать и изменять состояние любого бита в программе, а также просматривать состояние входных и выходных сигналов любой платы электроавтоматики. Изменяя состояния входных или промежуточных сигналов, можно имитировать различные ситуации на объекте управления и следить за его поведением. Отлаженный алгоритм записывается в ППЗУ.

Программируемые регулирующие контроллеры (ПРК). Для реализации более сложных алгоритмов, а также для замены групп обычных ПИ- и ПИД-регуляторов, используемых в системах управления параметрами технологических процессов, служит ПРК.

В состав ПРК помимо процессора входят многоканальные АЦП и ЦАП, ПЗУ, в котором записаны программы, реализующие различные алгоритмы регулирования. С панели оператора осуществляется оперативное управление, изменяются значения сигналов задания и ручного управления, параметры алгоритмов (законов) управления.

За рубежом ПРК, обеспечивающие прямое цифровое регулирование, используются достаточно широко. На их основе выпускаются различного типа микропроцессорные системы, такие как ТДС-2000 фирмы Honeywell и др. Отечественным программируемым регулирующим контроллером является «Ремиконт Р-100».

Структурная схема «Ремиконт Р-100», представленная на рис. 2.33, содержит процессор 1, ПЗУ 2, ОЗУ 3, панель оператора 4 и УСО, включающее мультиплексор 6, АЦП 5, ЦАП 7, дискретно-цифровые 8 и цифродискретные преобразователи 9. В состав «Ремиконт Р-100» входят также гальванические развязки 10, 11, 12, 13, блок сопряжения с другими комплексами 14.

Мультиплексор и АЦП осуществляют прием и преобразование 16 аналоговых сигналов. Кроме того, предусмотрена установка дополнительных мультиплексоров и АЦП, обеспечивающих в этом случае прием 64 аналоговых сигналов.

Центральный процессор в «Ремиконт Р-100» реализован на базе микропроцессора КР580ИК80. Постоянное ЗУ представляет собой полупроводниковую память, в которой хранятся функциональные программы. Программируется ПЗУ на заводе-изготовителе. Библиотека программ «Ремиконт Р-100» компонуется на базе стандартных алгоритмов: аналогового ПИД-регулирования; импульсного ПИД-регулирования; динамического преобразования (интег-

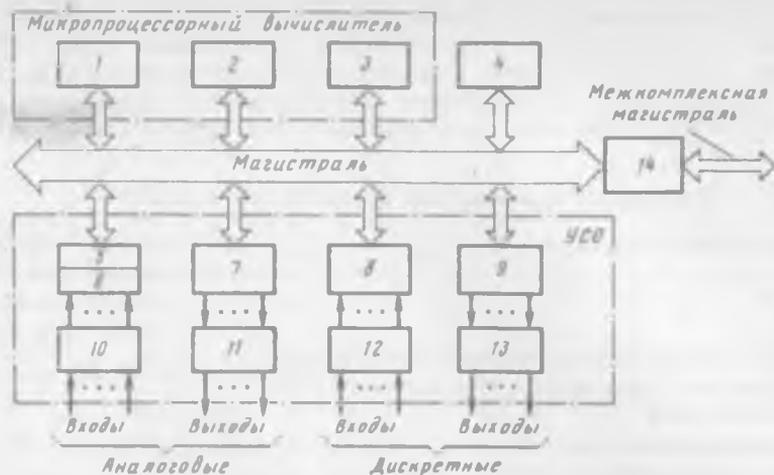


Рис. 2.33. Структурная схема программируемого регулирующего контроллера «Ремиконт Р-100»

рирования, дифференцирования и т. д.); статического преобразования (суммирования, умножения и т. п.); нелинейного преобразования (маскирования, переключения и т. п.); управляющей логики (операций сложения, умножения, выдержки времени и т. п.). Реализация этих алгоритмов позволяет строить системы автоматического управления технологическими процессами практически любой сложности. Оперативная память данных разделена на две области. Первая представляет собой ЗУ прямой выборки и используется для временного хранения промежуточных результатов расчета режимов работы и коэффициентов настройки, а вторая предназначена для хранения перепрограммируемых параметров «Ремиконт Р-100».

С панели оператора осуществляется оперативное управление, изменяются сигналы задания автоматического и ручного управления, контролируются значения технологических параметров, устанавливается требуемая конфигурация регулирующего контура, выбираются алгоритмы управления и параметры статической и динамической настройки «Ремиконт Р-100». Информация оператору представляется на панели при помощи цифровых индикаторов и светодиодов. Потребитель может выбирать (программировать) требуемую для данного объекта систему автоматического управления и проверять правильность ее функционирования.

При подобном подходе используется наиболее ценное свойство микропроцессорной техники — программируемость — и резко упрощаются наладка и эксплуатация системы управления.

Программируемые комбинированные контроллеры. В отечественной промышленности были разработаны и получили распростра-

нение контроллеры, реализующие одновременно функции регулирования и логического (дискретного) управления, т. е. контроллеры смешанного типа. Первым отечественным промышленным контроллером смешанного типа является программатор 1СИПП-16-005 «Орион-1», выпускаемый серийно с 1982 г.

Технические характеристики программатора «Орион-1»:

Алгоритмы управления	«время—команда» «время-параметр» «регулирование по ПИД-алгоритму»
Число программируемых временных интервалов	99
Длительность временного интервала мин:	
минимальная	0,01
максимальная	999
Погрешность отсчета времени, %	0,5
Число дискретных входных сигналов	48
Напряжение входных сигналов, В:	
в состоянии «1»	$24 \pm 4,8$
в состоянии «0»	0...3
Число дискретных выходных команд	48
Параметры коммутируемой электрической цепи:	
напряжение, В	до 30
ток, А	до 0,7
Число входных и выходных аналоговых сигналов,	4
Параметры сигналов по аналоговым каналам:	
Входное и выходное напряжение, В	0...10
суммарная абсолютная погрешность, мВ, не более	± 15
Последовательный канал связи, тип	«токовая петля»

Принцип работы программатора «Орион-1» по алгоритму «время—команда» и «время—параметр» предусматривает временную последовательную организацию цикла управления, при котором весь технологический процесс разбивается на определенное число временных интервалов, в начале которых программатор выдает запрограммированные команды (рис. 2.34).

Программатор позволяет запрограммировать по каждому аналоговому каналу два режима работы: первый—выдачу аналоговых сигналов разного уровня на временных интервалах, при этом аналоговые сигналы могут быть выданы скачком в начале интервала или по линейно изменяющемуся закону с нарастанием или уменьшением; второй—регулирование по ПИД-закону.

Переход с одного временного интервала на другой может происходить в режиме или безусловного перехода, или перехода по условию.

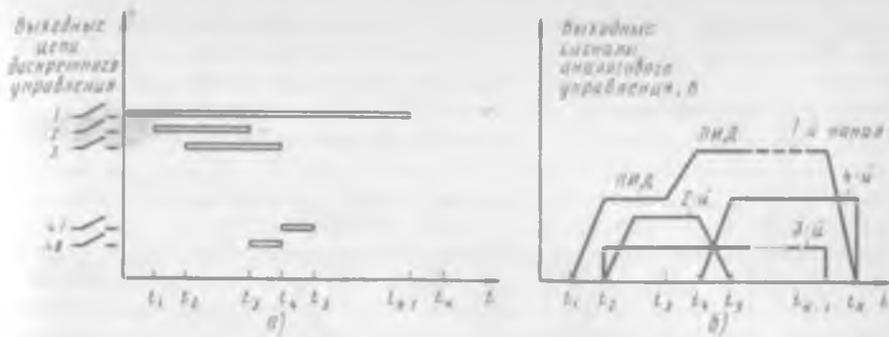


Рис. 2.34. Циклограмма алгоритмов:

а — «время — команда»; б — «время — параметр» с регулированием по ПИД-закону по 1-му каналу

Безусловный переход предполагает переход на следующий интервал по истечении времени текущего интервала. Режим условного перехода обеспечивает переход программы на следующий или другие временные интервалы при некоторых условиях. В качестве условий перехода используются различные программируемые наборы входных сигналов.

На рис. 2.35 представлена структурная схема программатора. В качестве управляющего устройства в «Орион-1» используют микроЭВМ «Электроника-60М» 15BM-16-012.

Шины ЭВМ соединяются с шинами УСО устройствами согласования УС. Обмен данными между центральным процессором и модулями УСО осуществляется через канал ЭВМ, при этом используются циклы «Ввод», «Вывод» и режим «Прерывание».

В состав модулей УСО «Орион-1» входят: модули ОЗУ (энергонезависимое) и ПЗУ, два модуля приема и выдачи (обмена)

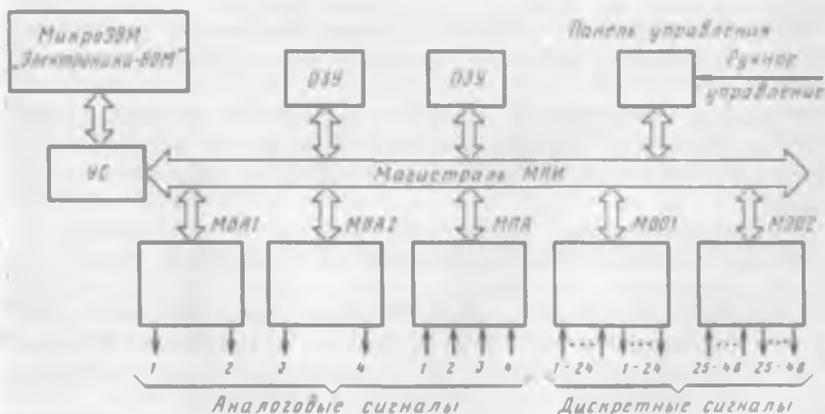


Рис. 2.35. Структурная схема программируемого контроллера «Орион-1»

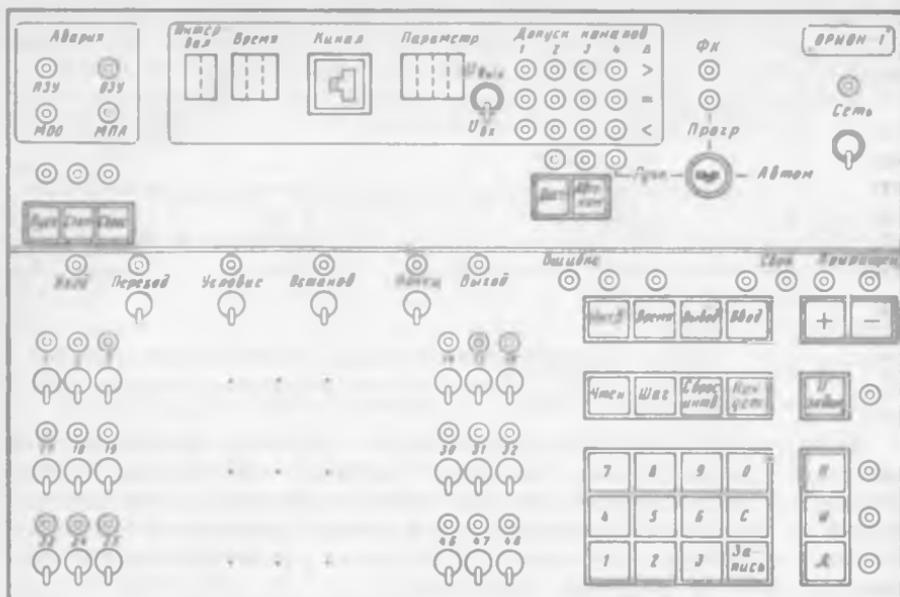


Рис. 2.36. Панель управления ПК «Орион-1»

дискретных сигналов с онтронной развязкой — модули обменные оптронные (МОО), модуль приема (МПА), модули выдачи (МВА) аналоговых сигналов, панель управления (рис. 2.36). Структурные схемы модулей МОО, МПА, МВА и их функционирование аналогичны схемам «Орион-3».

Программатор «Орион-1» работает в режимах «Ручной», «Программирование» и «Автоматический», которые устанавливаются ключом на панели управления (см. рис. 2.36).

В режиме «Ручной» с помощью переключателей, находящихся под фальшпанелью, возможна коммутация выходных цепей с 1-й по 48-ю.

В режиме «Программирование» осуществляется программирование конкретного технологического процесса с использованием клавиатуры и органов управления, расположенных на лицевой панели.

Программирование временных интервалов производится с помощью кнопок «Инт.», «Время» и цифровой клавиатуры. Номера временных интервалов отображаются на соответствующих индикаторах. При этом на индикаторах «Время» индицируется длительность программируемого временного интервала. В рабочем режиме («Автом.») на индикаторах может указываться время, оставшееся до конца текущего интервала.

Программирование коммутации дискретных выходов (с 1-го по 48-й) на соответствующем временном интервале производится с

помощью переключателей «1»...«48», «Переход», «Условие», «Останов», «Конец». Операция программирования на каждом интервале завершается нажатием кнопки «Запись».

Кнопки «Задан.», «П», «И», «Д» обеспечивают возможность программирования аналоговых выходных сигналов, значения которых отображаются на цифровых индикаторах. Если программируется только выдача значений по аналоговым выходам, то переключатель $U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}$ находится в положении $U_{\text{вых}}$. Если программируется режим регулирования, то переключатель ставится в положение $U_{\text{вх}}$. Номер канала управления при этом устанавливается с помощью переключателя «Канал». Программатор позволяет, прежде чем перейти на автоматический режим, просмотреть записанную программу, что выполняется с помощью кнопок «Чтен», и «Шаг» и соответствующих индикаторов.

Если ключ находится в положении «Автоном.», управление программатором происходит от кнопок «Пуск», «Стоп», «Сброс» или от сигналов, функционально аналогичных этим и поступающих на внешний соединитель программатора, что позволяет вынести управление программатором на лицевую панель технологического оборудования. В этом режиме работы допускается дистанционное управление программатором по последовательному каналу (ИРПС) при нажатии кнопки «Дист».

Кнопка «Стоп» прекращает движение программы, однако при этом сохраняются включенными дискретные и аналоговые выходы, запрограммированные на текущем интервале времени. Для перевода программы в исходное состояние необходимо нажать после кнопки «Стоп» кнопку «Сброс». Кнопка «Пуск» запускает или возобновляет движение программы в режиме «Автоном.».

«Орион-1» позволяет вывести программу управления процессом на перфоленту для последующего использования и ввести программу с перфолент, что производится с помощью соответствующих кнопок «Вывод» и «Ввод». Программатор производит диагностику исправности устройств ОЗУ, ПЗУ, модулей МОО и МПА, отображая результат диагностики на соответствующих световых индикаторах.

2.5. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В технологическом оборудовании микроэлектроники необходимо контролировать большое количество различных параметров. В любой автоматической системе управления можно выделить объект управления (ОУ) с первичными преобразователями (датчиками Д), вторичными измерительными преобразователями (ИП) и исполнительными устройствами (ИУ), устройство управления

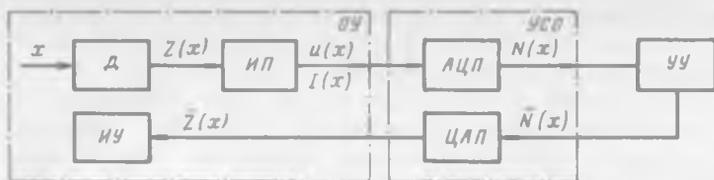


Рис. 2.37. Упрощенная структурная схема автоматической системы управления (УУ) и устройство согласования с объектом (УСО) (рис. 2.37), включающее ЦАП.

В функции датчиков входят получение информации о состоянии объекта управления и при необходимости преобразование неэлектрического параметра x в электрический сигнал $Z(x)$, как правило, аналогового характера. В МПСУ электрический сигнал $Z(x)$, поступая в УСО, преобразуется АЦП в цифровой код, а затем поступает в УУ, где сравнивается с заданным значением параметра. При этом вырабатывается команда для ИУ, которая, поступая в УСО, преобразуется ЦАП из цифровой в аналоговую форму. Затем команда подается на ИУ, которое приближает параметры объекта управления к заданным.

По виду входной величины различают измерительные преобразователи перемещений, скорости, температуры, давления, влажности, расхода газов и т. д. Измерительные преобразователи характеризуются видом входной величины, диапазоном измерений, чувствительностью, погрешностью преобразования, быстродействием, уравнением преобразования, видом выходной величины, принципом действия и т. д.

Одной из главных характеристик измерительных преобразователей является погрешность преобразования, которая состоит из основной погрешности, свойственной преобразователю при работе в нормальных условиях, и дополнительной, возникающей при отклонении внешних условий от нормальных. Погрешность в зависимости от текущего значения входной величины обычно представляют в виде двух частей: аддитивной, т. е. не зависящей от значений входной величины, и мультипликативной, пропорциональной текущему значению входной величины.

В технологическом оборудовании микроэлектроники при контроле температуры до 1600°C погрешность измерения, как правило, не должна превышать долей градуса, перемещение в диапазоне от 1 до 200 мм — $0,2...0,5$ мкм, давление от $10^{-5}...10^{-6}$ Па (при нанесении пленок) до 100 кПа (при эпитаксии) — $10^{-7}...10^{-9}$ Па, расход газов в диапазоне от 0,1...1 л/ч (для плазмохимического оборудования) с точностью измерения (1...3)% до $25\text{ м}^3/\text{ч}$ (расход водорода при эпитаксии) с точностью до 5...10% и т. д. Кроме того, измерительные преобразователи применяются также для контроля чистоты технологических газов и жидкостей (табл. 2.6) и параметров технологического микроклимата (табл. 2.7).

Таблица 2.6. Контроль чистоты технологических газов и жидкостей

Анализируемый газ (жидкость)	Измеряемая примесь (параметр)	Пределы измерения	Допустимая погрешность измерения, %
Азот, аргон, водород, кислород, воздух	Пары воды	$(0...5) \cdot 10^{-4}\%$	± 10
		$(0...20) \cdot 10^{-4}\%$	± 6
Азот, аргон Азот, аргон	Кислород Водород	$(0...1000) \cdot 10^{-4}\%$	$\pm (4...6)$
		$10^{-3}\%$	± 10
		$10^{-2}\%$	± 6
Азот, аргон, кислород, водород	Диоксид углерода	$10^{-1}\%$	± 10
		$5 \cdot 10^{-3}$ об. %	± 10
Азот, аргон, кислород, водород, воздух Деионизованная вода	Аэрозоли Удельное сопротивление	Минимальный размер частиц 0,5 мкм	$\pm (5...10)$
		3...30 МОм см	± 5

Рассмотрим применяемые в технологическом оборудовании преобразователи.

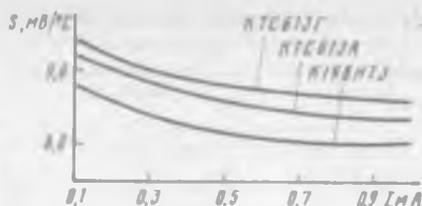
Первичные преобразователи температуры. Диапазон используемых температур в современном производстве ИМС составляет $-270...+1600^\circ\text{C}$ и не перекрывается ни одним из известных первичных измерительных преобразователей температуры. Весь этот диапазон обычно перекрывают набором из трех групп первичных измерительных преобразователей:

1) в диапазоне $-50...+150^\circ\text{C}$ используют полупроводниковые измерительные преобразователи;

Таблица 2.7. Контроль параметров технологического микроклимата

Контролируемый параметр	Диапазон измерения	Оптимальная норма	Требуемая точность поддержания, не более	Погрешность измерения
Температура, $^\circ\text{C}$	10...40	20...25	0,2...2,0 $^\circ\text{C}/\text{ч}$	$\pm (0,05...0,2)^\circ\text{C}$
Относительная влажность, %	30...80	40...60	$\pm (5...10)$	1...2%
Концентрации аэрозолей размером 0,5 мкм и более, частиц/л, для помещений класса чистоты:				
1	—	5	—	20%
2	—	35	—	20%
3	—	350	—	10%
4	—	1000	—	5%
Скорость вертикального воздушного потока, м/с, для помещений класса чистоты:				
1	—	0,25	—	$\pm 10\%$
2	—	0,15	—	—
3	—	0,08	—	—
4	—	0,85	—	—

Рис. 2.38. Зависимость крутизны преобразования от тока



2) в диапазоне $-270...+600$ С используют медные и платиновые термометры сопротивления;

3) в диапазоне $-50...+1600$ С используют термоэлектрические преобразователи (термометры) различных типов.

Работа полупроводниковых измерительных преобразователей температуры основана на линейной зависимости падения напряжения u от температуры T на прямосмещенном $p-n$ -переходе при постоянном значении протекающего тока I :

$$u = \frac{\Delta E}{q} - kT \ln \frac{I_1}{I_2}$$

где q —заряд электрона; ΔE —ширина запрещенной зоны; I_2 —обратный ток $p-n$ -перехода.

Нелинейность характеристики «температура — напряжение» кремниевых планарных $p-n$ -переходов не превышает $0,1...1$ С, при этом крутизна преобразования составляет 2 мВ/° С при токах $0,1...1$ мА. Улучшение линейности передаточной характеристики измерительных преобразователей на основе $p-n$ -перехода достигается использованием двух транзисторов, изготовленных на одной подложке, через которые протекают разные коллекторные токи ($I_1 / I_2 = 8$), при этом нелинейность разности падений напряжений на эмиттерных $p-n$ -переходах составляет $0,05$ С. Как правило, погрешность ИП не может быть точно скомпенсирована при дальнейших преобразованиях в канале МПСУ, поэтому важнейшей характеристикой ИП является стабильность передаточной характеристики. Из выпускаемых промышленностью полупроводниковых приборов в качестве ИП температуры наиболее удобны транзисторные сборки.

На рис. 2.38 приведена зависимость крутизны преобразования S в диапазоне $0...100$ С от тока для транзисторных сборок КТС613А, КТС613Г и К198НТЗ с четырьмя последовательно включенными $p-n$ -переходами. При этом среднеквадратическое отклонение крутизны преобразования в каждой партии сборок не превышает 2% среднего значения.

В термометрах сопротивления используется зависимость электрического сопротивления металлической проволоки от температуры окружающей среды. В качестве материала проволоки обычно используют платину или медь. Термометры сопротивления типа

ТСП из платиновой проволоки диаметром 0,05...0,1 мм применяются для измерения в диапазоне $-260...+750^{\circ}\text{C}$. В некоторых случаях за счет увеличения диаметра проволоки до 0,4 мм удается использовать платиновые термометры при температуре до 1100°C . Чистая платина устойчива в окислительной среде (воздушной) и длительно сохраняет свою градуировку, чем обусловлены высокие метрологические характеристики платиновых термометров. К недостаткам платиновых термометров сопротивления следует отнести нелинейную зависимость сопротивления от температуры, а также высокую стоимость.

С этой точки зрения выгодно отличаются термометры сопротивления типа ТСМ на основе медной проволоки, которые дешевле и у которых зависимость сопротивления от температуры линейная ($\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}$). К числу недостатков таких термометров следует отнести малое удельное сопротивление меди ($\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и интенсивную окисляемость ее даже при небольших температурах. Термометр сопротивления имеет погрешность, обусловленную его разогревом протекающим током. Для уменьшения этой погрешности чувствительный элемент термометра должен обладать малым тепловым сопротивлением относительно объекта. Это достигается тщательным проектированием и изготовлением термометров сопротивления.

Работа термоэлектрических преобразователей основана на том, что в цепи, составленной из двух разнородных проводников, возникает термо-ЭДС, величина которой зависит от материалов проводников и температуры в местах их соединения.

Термоэлектрические преобразователи с термоэлектродами из благородных (платинородий-платина и др.) и неблагородных (хромель-копель, хромель-алюмель и др.) металлов широко применяют для измерения температуры в диапазоне $-200...+1800^{\circ}\text{C}$ в окислительной и нейтральной средах. Поскольку не удается сделать термоэлектроды однородными, то ТЭП одного и того же типа имеют различные градуировочные характеристики, а допускаемые погрешности в зависимости от назначения (разряда ТЭП) лежат в пределах $0,1...8^{\circ}\text{C}$. Следует отметить, что ТЭП платиновой группы позволяют более точно измерять температуру по сравнению с остальными, но имеют высокую стоимость, поэтому целесообразнее использовать ТЭП из неблагородных материалов. Термоэлектрические преобразователи выпускаются малой (до 5 с), средней (до 60 с) и большой (до 180 с) инерционности.

Во время эксплуатации ТЭП при высоких температурах или в агрессивных средах в электродах происходят различные физико-химические процессы, в результате которых изменяется градуировочная характеристика и увеличиваются погрешности измерения. Так, зависимость ухода ΔT градуировочной характеристики термопреобразователя «хромель-алюмель» (ХА) от времени

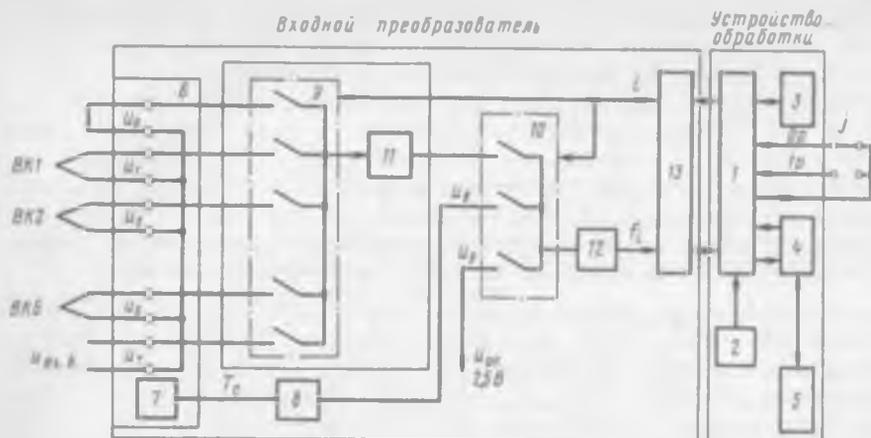


Рис. 2.39. Функциональная схема вторичного измерительного преобразователя со встроенной микроЭВМ

эксплуатации $\Delta T = 0,72t^{0,6767}$. Поскольку процесс изменения градуировочной характеристики медленный, то существенно уменьшить погрешность измерения удастся введением поправки в соответствии с приведенным выражением.

Вторичные измерительные преобразователи температуры. Применение микроЭВМ, например однокристалльной ЭВМ С5-31, во вторичных преобразователях позволяет повысить точность измерения и дает такие новые возможности как учет индивидуального разброса статических характеристик первичных измерительных преобразователей, цифровая линейаризация, упрощение аналоговых узлов и т. д.

На рис. 2.39 показана функциональная схема вторичного измерительного преобразователя температуры со встроенной микроЭВМ, который содержит два гальванически развязанных узла: входной преобразователь и устройство обработки.

Устройство обработки содержит микроЭВМ 1, схему синхронизации 2, устройство индикации 3, энергонезависимое ЗУ 4 и пульт ввода поправок 5.

Входной преобразователь включает термощунт 6, на котором размещены входные клеммы подключения ТЭП ВК1...ВК6, датчик 7 измерителя 8 температуры свободных концов ТЭП, коммутаторы 9, 10, усилитель 11, преобразователь «напряжение — частота» (ПНЧ) 12 и устройство оптронной развязки 13.

Входной преобразователь обеспечивает усиление напряжения ТЭП до уровня 10 В, измерение температуры свободных концов ТЭП, а также преобразование сигналов в частоту 0...100 кГц. Два дополнительных входа (0-й и 7-й) служат для автоматической калибровки входного преобразователя. Для усиления всех сигнала

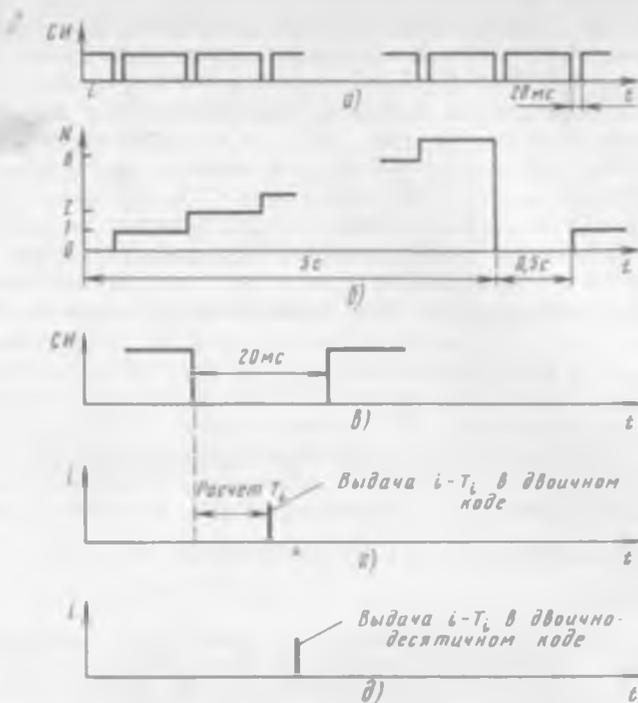


Рис. 2.40. Временная диаграмма работы вторичного измерительного преобразователя температуры со встроенной микроЭВМ

лов используется один и тот же тракт, к которому выбранный ТЭП подключается коммутаторами, управляемыми устройством обработки. Каждый ТЭП с помощью коммутатора циклически подключается к усилительному тракту в течение 0,5 с. Импульсы, поступающие за это время на устройство обработки, суммируются микроЭВМ, где образуется массив из десяти чисел:

N_0 — при закорачивании входа тракта;

N_1, N_2, \dots, N_6 — при подключении ТЭП ВК1...ВК6 соответственно;

N_7 — при подаче на вход эталонного сигнала $u_{\text{н.н.}}$, соответствующего верхнему пределу измерения;

N_8 — при подаче напряжения с датчика температуры свободных концов;

N_9 — при подаче напряжения, соответствующего верхнему пределу измерения температуры свободных концов ТЭП.

Работа преобразователя поясняется рис. 2.40. Схема синхронизации 2 формирует синхрои́мпульсы (СИ) (рис. 2.40, а), определяющие временную диаграмму работы преобразователя. При низком уровне СИ производится расчет температуры горячих

спаев ТЭП ВК1...ВК6, при высоком уровне — счет импульсов, поступающих с ПНЧ. Номер подключаемого входа изменяется по срезу СИ (рис. 2.40, б). Последнее позволяет исключить влияние переходных процессов во входном преобразователе на точность измерения температуры. На рис. 2.40, г, д в увеличенном масштабе показано положение импульсов выдачи температуры в двоичном и двоично-десятичном кодах соответственно относительно среза СИ (рис. 2.40, в). Результаты расчета температуры выдаются на устройстве индикации с градуировкой младшего разряда $0,1^\circ\text{C}$.

За время 20 мс микроЭВМ производит следующие операции: вычисляет напряжение i -го ТЭП, приведенное к верхнему пределу измерения,

$$u_i = \frac{N_i - N_0}{N_7 - N_0}$$

и температуру свободных концов ТЭП, нормированную к 25°C .

$$\tilde{T}_c = N_8 / N_9.$$

После этого напряжение с ТЭП приводится к $T_c = 0$:

$$\tilde{U}_i = u_i + \Phi(T_c), \quad (2.9)$$

где $\Phi(T_c)$ — функция, полученная в результате линеаризации номинальной статической характеристики ТЭП в диапазоне изменения температуры свободных концов $0 \dots 50^\circ\text{C}$:

$$\Phi(\tilde{T}_c) = \begin{cases} a_0 + b_0 \tilde{T}_c & \text{при } \tilde{T}_c \leq 1, \\ a_1 + b_1(\tilde{T}_c - 1) & \text{при } \tilde{T}_c > 1. \end{cases}$$

Напряжение ТЭП, приведенное к $T_c = 0$, согласно (2.9) связано с температурой горячего спаев ТЭП нелинейным соотношением. Поэтому для вычисления температуры требуется линеаризация. Для этого рабочий диапазон изменения напряжения статической характеристики ТЭП разбивается на 64 равных кусочно-линейных отрезка, каждый из которых задается крутизной S_i . В этом случае алгоритм преобразования напряжений в температуру весьма прост:

$$\tilde{T}_i = \sum_{i=1}^k S_i + S_{k+1} (64\tilde{U}_i - k), \quad (2.10)$$

где $k = [64\tilde{U}_i]$ — целая часть числа $64\tilde{U}_i$.

Коэффициенты S_i для статических характеристик ХК ($0 \dots 600^\circ\text{C}$), ХА ($0 \dots 1100^\circ\text{C}$), ПП ($0 \dots 1300^\circ\text{C}$) и ПР ($300 \dots 1600^\circ\text{C}$) хранятся в ПЗУ микроЭВМ. В случае точного соответствия ТЭП градуировочной характеристике вычисление по (2.10) будет давать истинное значение характеристики реальных ТЭП. Однако реальные статические характеристики ТЭП отличаются от установлен-

Таблица 2.8. Характеристика моделей преобразователей

Номер модификации	Тип ТЭП (ГОСТ 3044-84)	Диапазон измеряемых температур, °С	$U_{\text{н.к.}}$, мВ	Основная погрешность, С	Класс точности, %
0	ХК	0...600	49,090	0,6	0,1
1	ХА	0...1100	45,108	0,55	0,05
2	ПП	0...1300	13,107	0,65	0,05
3	ПР	300...1600	11,429	0,8	0,05

ных, что приводит к дополнительной погрешности измерения. Наличие микроЭВМ позволяет компенсировать эту составляющую погрешности. Для этого путем сопоставления используемых ТЭП с образцовым составляется таблица поправок в точках, кратных 50°С. Массив поправок на каждые шесть ТЭП хранится в энергонезависимом ЗУ. Диапазон изменения поправок — 12,7... + 12,7°С. В процессе эксплуатации имеется возможность изменения поправок. С учетом поправок истинное значение температуры определяется следующим образом:

$$T_i = \tilde{T}_i + \Delta_{im} + \frac{\Delta_{im+1} - \Delta_{im}}{\Delta T} L,$$

где $\Delta T = 50^\circ\text{C}$; $m = [\tilde{T}_i / \Delta T]$; $L = \tilde{T}_i / \Delta T - m$; Δ_{im} — значение поправки для i -го ТЭП на температуре $(m+1)\Delta T$.

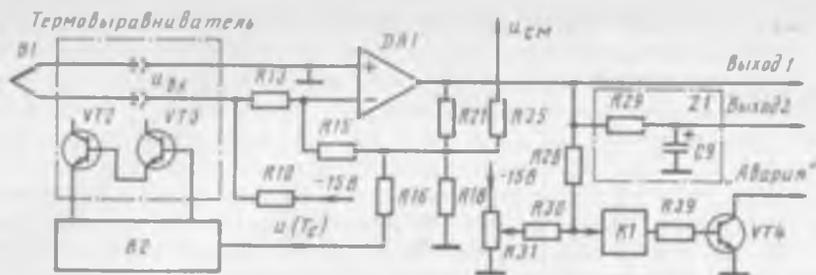
Основные технические характеристики моделей описанного вторичного преобразователя представлены в табл. 2.8.

Для усиления напряжения термодЭДС термопреобразователей градуировок ХК, ХА, ПП, ПРЗО/6 до уровня 0...10В с компенсацией температуры свободных концов в диапазоне 5...50°С применяются аналоговые преобразователи ПИ.ТРА (табл.2.9).

Высокая точность в преобразователях ПИ.ТРА достигается за счет прецизионного УПТ и устройства компенсации термодЭДС свободных концов термопреобразователя. Температурный дрейф напряжения смещения нуля 0,07...0,12 мкВ/К, коэффициент усиления без обратной связи более 10^7 .

Таблица 2.9. Характеристики преобразователей ПИ.ТРА

Обозначение модификации	Тип ТЭП (ГОСТ 3044-84)	Диапазон измеряемых температур, °С	Класс точности, %
ПИ.ТРА-0/600-001	ХК	0...600	0,10
ПИ.ТРА-0/1100-002	ХА	0...1100	0,05
ПИ.ТРА-0/1300-003	ПП	0...1300	0,05
ПИ.ТРА-300/1600-004	ПР	300...1600	0,05
ПИ.ТРА-300/1250-005	ПР	300...1250	0,05
ПИ.ТРА-0/150-006	ХК	0...150	1,0



2.41. Функциональная схема преобразователя ПИ.ТРА

Для измерения температуры свободных концов термопреобразователя используется температурная зависимость напряжения на $p-n$ -переходе. При токе $0,3 \text{ мА}$ напряжение на эмиттерном переходе транзистора КТ315 линейно зависит от температуры с коэффициентом $-1,97 \text{ мВ/К}$ при среднеквадратическом отклонении $0,02 \text{ мВ/К}$.

Преобразователь ПИ.ТРА (рис. 2.41) содержит термовыравниватель, компенсатор В2 термоЭДС свободных концов термопреобразователя В1, суммирующий усилитель постоянного тока DA1, фильтр нижних частот Z1 и компаратор К1.

Сигнал с термопреобразователя В1 через термовыравниватель поступает на усилитель DA1, на который также подается напряжение смещения и напряжение $u(T_c)$. Выходное напряжение усилителя

$$u_{\text{вых}} = K_1 u_{\text{вх}} + K_2 u(T_c) + K_3 u_{\text{см}},$$

где $K_1 = -\frac{R_{15}}{R_{13}} \left[1 + R_{21} \left(\frac{1}{R_{15}} + \frac{1}{R_{16}} + \frac{1}{R_{18}} + \frac{1}{R_{35}} \right) \right]$ — коэффициент передачи усилителя по первому (термопарному) входу; $K_2 = -R_{21}/R_{16}$ — коэффициент передачи усилителя по второму входу (компенсация термоЭДС свободных концов ТЭП); $K_3 = -R_{21}/R_{35}$ — коэффициент передачи по входу смещения.

Компенсатор В2 термоЭДС свободных концов ТЭП с помощью транзисторных датчиков VT2, VT3 измеряет температуру T_c свободных концов. Рабочий диапазон температуры окружающего воздуха $5...50 \text{ }^\circ\text{C}$ разбит на два кусочно-линейных участка (см. (2.9)). Это позволяет достигнуть точности компенсации термоЭДС свободных концов $0,1...0,15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Напряжение $u_{\text{см}}$ смещает переходную характеристику преобразователя, что может быть использовано для сдвига начала отсчета температуры.

Компаратор К1 служит для формирования сигнала «Авария» в случае обрыва или перегрева ТЭП, когда выходное напряжение преобразователя превышает пороговое u_n , установленное резистором R31. При обрыве ТЭП на вход преобразователя через

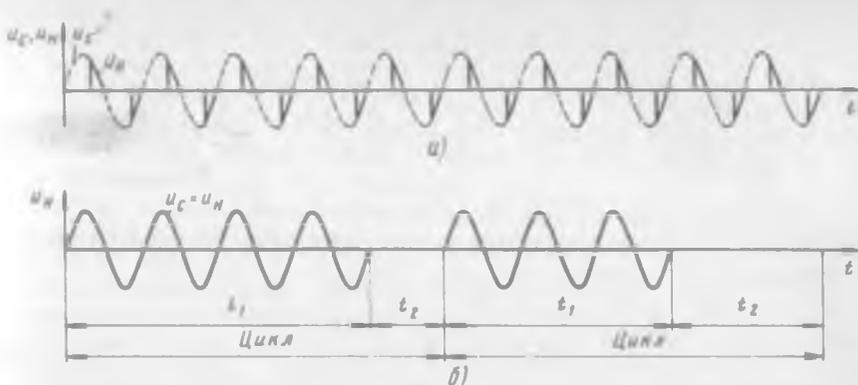


Рис. 2.42. Управление мощностью в нагрузке:

а — фазовое управление. *б* — циклическое управление (u_c — напряжение в сети, u_n — напряжение на нагрузке)

высокоомный резистор $R10$ поступает отрицательное напряжение около 0,5 В, выходное напряжение превышает 10 В, что приводит к срабатыванию компаратора К1 и появлению сигнала «Авария».

При построении прецизионных систем регулирования температуры преобразователи ПИ.ТРА целесообразно использовать вместе с цифровыми регуляторами на базе блоков управления «Орион-3» или аналоговыми регуляторами ПР.ТРА-0,05.

В настоящее время преобразователи ПИ.ТРА нашли широкое применение в диффузионном, эпитаксиальном и других видах оборудования.

2.6. УСИЛИТЕЛИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИГНАЛОВ

Номенклатура устройств, преобразующих и исполняющих команды микропроцессорного блока управления, весьма широка. Рассмотрим лишь те устройства, которые являются типовыми представителями своей группы и которые нашли широкое применение в различных видах специального технологического оборудования микроэлектроники.

Для обеспечения плавного изменения мощности на нагрузке в качестве усилителей мощности наибольшее распространение в специальном технологическом оборудовании получили одно- и трехфазные тиристорные усилители и транзисторные и тиристорные ключи для коммутации напряжения на дискретных устройствах управления — электромагнитных клапанах, заслонках и т. п.

Тиристорные усилители. Для регулирования напряжения или мощности в нагрузке с помощью тиристоров используются методы фазового и циклического управления, эпюры напряжений которых приведены на рис. 2.42.

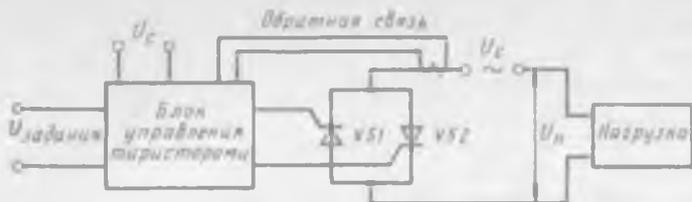


Рис. 2.43. Функциональная схема однофазного тиристорного усилителя мощности

Наибольшее распространение получил метод фазового управления, так как он обеспечивает плавное регулирование, что весьма важно для малоинерционных объектов. Однако некоторые особенности усилителей при фазовом управлении могут привести к ухудшению работы системы регулирования. Это, прежде всего, наличие нелинейной зависимости между сигналом управления и выходным параметром (напряжением или мощностью на нагрузке). Характер этой зависимости определяется схемой включения тиристоров. В однофазных усилителях мощности систем регулирования широкое применение получила схема со встречно-параллельным включением тиристоров (рис. 2.43).

Фазовый угол, отсчитываемый от момента прохождения напряжения сети через нуль до момента подачи управляющего импульса, называется углом открытия тиристора α (рис. 2.44).

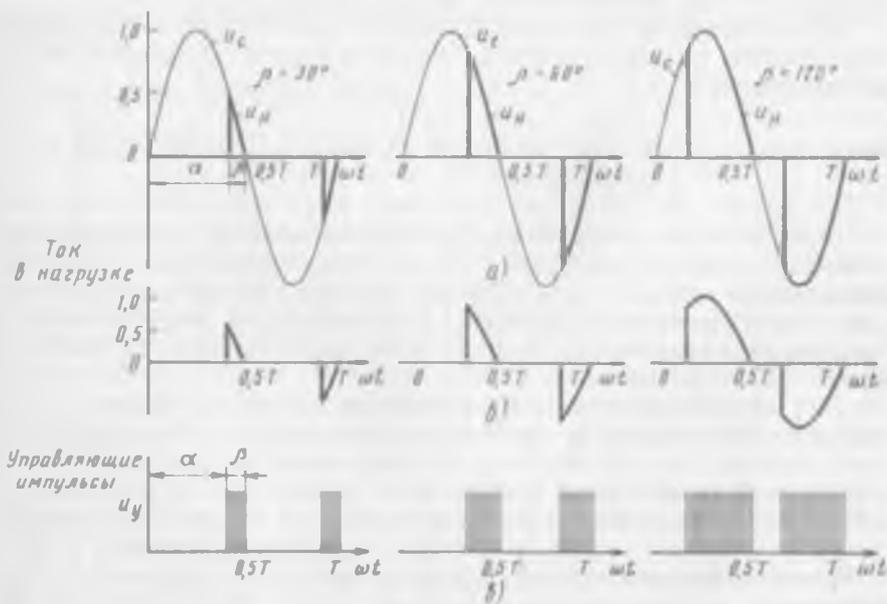


Рис. 2.44. Графики напряжений и токов при фазовом управлении:

а) напряжение на нагрузке; б) ток в нагрузке; в) напряжение управляющих импульсов

Фазовый угол β , в течение которого тиристор остается в проводящем состоянии, носит название угла проводимости.

Угол открытия определяется напряжением, подаваемым на систему управления тиристорами, которое формирует управляющий импульс и обеспечивает его сдвиг по фазе в интервале $0 \dots \pi$. Для активной нагрузки $\alpha = \pi - \beta$.

Среди промышленных систем регулирования наиболее распространены системы регулирования температуры различных объектов. Поскольку температура определяется подводимой к объекту мощностью, тепловой режим в некоторых случаях поддерживается стабилизацией активной мощности. Зависимость мощности в активной нагрузке (нагреватели тепловых объектов в большинстве случаев представляют собой активную нагрузку) от угла открытия α или угла проводимости β может быть выражена следующим соотношением:

$$P_n = \frac{P_m}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) = \frac{V_m^2}{\pi R_n} \left(\beta - \frac{\sin 2\beta}{2} \right), \quad (2.11)$$

где P_m — максимальная активная мощность; V_m — амплитудное напряжение на нагрузке; R_n — сопротивление нагрузки.

Так как зависимость между входным напряжением усилителя мощности $V_{зд}$ и углом проводимости β линейная, можно записать

$$\beta = \pi \frac{V_{зд}}{(V_{зд})_m} = \pi \mu, \quad (2.12)$$

где $(V_{зд})_m$ — напряжение на входе усилителя мощности при $\beta = \pi$. С учетом (2.12) уравнение (2.11) может быть переписано следующим образом:

$$P_n = \frac{V_m^2}{\pi R_n} \left(\pi \mu - \frac{\sin 2\pi \mu}{2} \right).$$

Усилитель мощности как элемент системы регулирования характеризуется двумя коэффициентами передачи — динамическим k_d и статическим k_c (постоянная времени усилителя по сравнению с постоянной времени объекта управления практически равна нулю):

$$k_d = \frac{dP_n}{d\mu} = \frac{V_m^2}{R_n} (1 - \cos 2\pi \mu), \quad (2.13)$$

$$k_c = \frac{P_n}{\mu} = \frac{V_m^2}{R_n} \left(1 - \frac{1}{2\pi \mu} \sin 2\pi \mu \right). \quad (2.14)$$

На рис. 2.45 приведены зависимости мощности в нагрузке P_n , динамического k_d и статического k_c коэффициентов передачи от относительного значения входного сигнала усилителя мощности μ . На рисунке показано, что коэффициенты передачи k_d и k_c

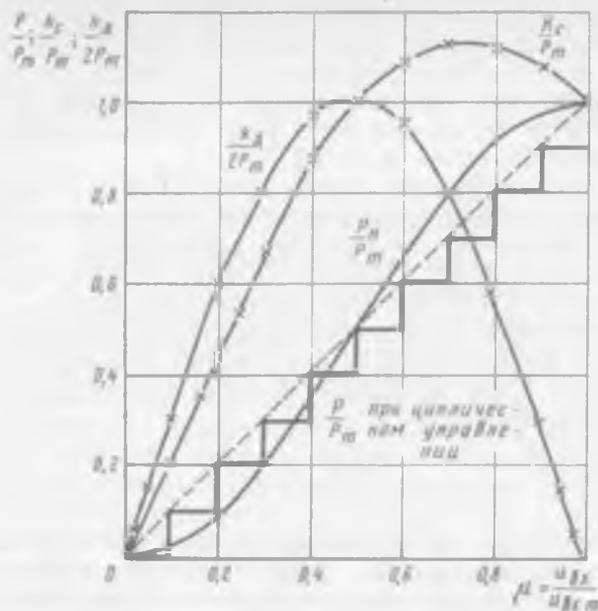


Рис. 2.45. Зависимость мощности в нагрузке, статического и динамического коэффициентов передачи от относительного значения входного сигнала усилителя мощности

изменяются от нуля (при $\mu=0$) до следующих значений: $k_d=2P_m$, $k_c=1$ (при $\mu=0,5$) и $k_d=0$ и $k_c=P_m$ (при $\mu=1$).

Зависимость значений статического и динамического коэффициентов передачи от уровня усиливаемого сигнала — одно из важнейших следствий нелинейности характеристики усилителя мощности со встречно-параллельным включением тиристоров.

Возмущения, вносимые изменением сопротивления нагрузки и напряжения сети, как следует из уравнений (2.13) и (2.14), приводят к изменениям коэффициентов передачи усилителя мощности. Изменение тепловых потерь ведет к изменению статической характеристики объекта, а это, в свою очередь, означает изменение коэффициента передачи объекта. Вариация коэффициента может привести к ухудшению динамических свойств системы и даже к нарушению устойчивости.

Линейную характеристику усилителя мощности $P_n = kV_{зд}$ можно получить за счет сигнала обратной связи, пропорционального мощности, выделяемой в нагрузке.

На рис. 2.46 представлена структурная схема блока управления тиристорами усилителя мощности нагревателей реактора диффузионного оборудования, а на рис. 2.47 — диаграммы изменения напряжения в контрольных точках КТ1...КТ6 блока управления.

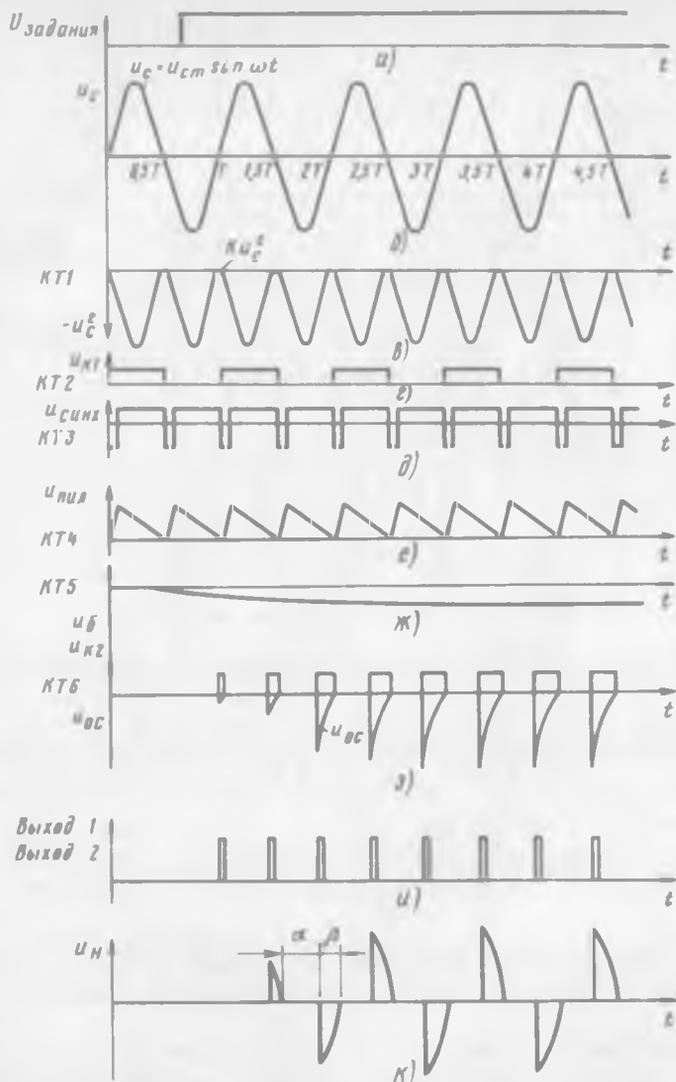


Рис. 2.47. Диаграмма изменений напряжений на нагрузке и в контрольных точках блока управления тиристорами:

a — напряжение задания, *б* — напряжение сети, *в* — инвертированное напряжение после квартиратора $KT1$, *г* — напряжение в $KT2$; *д* — напряжение в $KT3$; *е* — пилообразный импульс напряжения, *ж* — напряжение после интегратора, *з* — напряжение в $KT6$, *и* — напряжение на выходе блока управления тиристорами, *к* — напряжение на нагрузке

нием генератора 9 на его падающей ветви. При положительных значениях напряжения синхронизации $V_{синхр}$ ($KT3$) и $V_{\delta} > V_{пид}$ на выходе компаратора 5 ($KT6$) появляется сигнал, который посту-

пает на формирователь импульсов 6 и ключ 4. Формирователь импульсов 6 генерирует сигналы $V_{\text{им}}$, которые через разделительный трансформатор Т2 поступают на управляющие электроды тиристоров. В зависимости от момента, при котором в компараторе 5 наступает равенство $V_{\text{с}}$ и $V_{\text{им}}$, происходит генерация управляющих импульсов, т. е. обеспечивается фазовое регулирование. Напряжение, поступающее на ключ 4, замыкает его на время, в течение которого тиристоры открыты. Изменение сигнала на выходе интегратора (КТ5) прекращается при равенстве сигналов $V_{\text{им}}$ и $V_{\text{с}}$, при этом его значение будет пропорционально активной мощности в нагрузке.

Таким образом, блок управления тиристорами обеспечивает открытие тиристоров на такой угол β , при котором в активной нагрузке выделяется мощность, равная заданной.

За счет обратной связи по току в нагрузке в блоке управления организуется защита по току, уровень срабатывания которой регулируется потенциометром $R_{\text{мощ}}$. Сигнал, пропорциональный току в нагрузке, поступает на компаратор 10 и в случае превышения напряжения $V_{\text{мощ}}$ запирает формирователь импульсов, что приводит к запрещению подачи импульсов на управляющие электроды тиристоров.

Счетчик 11 и схема 12, выполненная на ПЗУ, позволяют разделить каналы блока при работе на различные нагреватели реактора диффузионной печи.

Одним из существенных недостатков фазового метода управления следует считать сравнительно высокий уровень высокочастотных помех, генерируемых во внешние цепи при коммутации нагрузки.

Циклический метод управления обеспечивает линейную функцию преобразования и при его реализации практически отсутствуют высокочастотные помехи, так как коммутация нагрузки осуществляется в момент равенства нулю тока нагрузки.

На рис. 2.42, б представлены кривые изменения напряжения на нагрузке при циклических методах управления. При этом методе изменение мощности в нагрузке осуществляется путем изменения числа периодов сетевого напряжения в цикле регулирования, который может содержать от одного до десятков периодов. От числа периодов в цикле зависит дискретность изменения электрической мощности в нагрузке. При двух периодах дискретность составит 50%, а при двадцати — уже 5%.

Это положение необходимо учитывать при оценке точностных характеристик системы регулирования, например температуры объекта. Для малоинерционных объектов с постоянной времени порядка единиц секунд существенным обстоятельством при циклическом методе управления является время t_2 (см. рис. 2.42, б), в течение которого тиристоры закрыты и через нагрузку не протекает ток. При двадцати периодах в цикле регулирования это

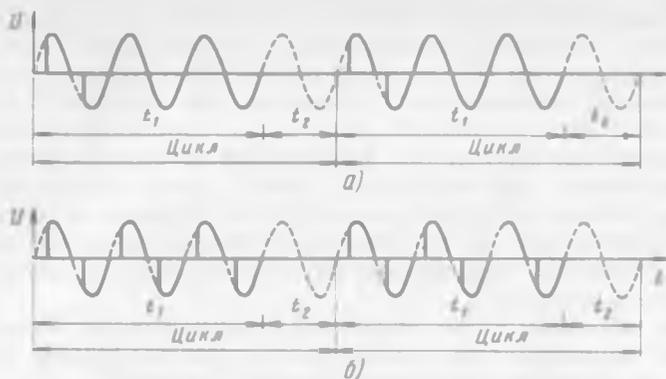


Рис. 2.48. Диаграмма напряжения на нагрузке при фазоциклическом (а) и цикло-фазовом (б) методах управления мощностью

время при минимальной мощности составляет около 0,4 с, а при пятидесяти — около 1 с.

Фазоциклический метод управления (ФЦУ), сохраняя практически все достоинства циклического метода, обеспечивает возможность уменьшения дискретности преобразования. При этом методе в течение цикла преобразования осуществляется обычное циклическое управление, а в каждом периоде — фазовое управление, как это показано на рис. 2.48, а. При этом средняя за период преобразования (цикл) мощность, выделенная на нагрузке, определяется как $P_{\text{н}} = P_{\text{ц}} + P_{\text{ф}}$, где $P_{\text{ц}}$ — средняя за цикл преобразования мощность при циклическом методе; $P_{\text{ц}} = n/N$, при этом n — число периодов в цикле с открытыми тиристорами, а N — общее число периодов в цикле; $P_{\text{ф}}$ — средняя за цикл преобразования мощность при фазовом управлении за период; $P_{\text{ф}} = P_{\text{ф}}/N$; $P_{\text{ф}}$ — средняя за период мощность при фазовом управлении. С учетом (2.11)

$$P_{\text{н}} = \frac{V_{\text{н}}^2}{R_{\text{н}}} \left(\frac{n-1}{N} + \frac{\pi\mu - \sin 2\pi\mu}{\pi\mu} \right).$$

Другим комбинированным методом управления активной мощностью является циклично-фазовый метод, при котором в течение цикла так же, как и в предыдущем случае, осуществляется циклическое управление, а в каждом периоде подключения нагрузки к источнику переменного тока напряжения — фазовое. Диаграмма напряжения на нагрузке приведена на рис. 2.48, б. При этом значение средней за время цикла активной мощности определяется как

$$P_{\text{н}} = P_{\text{ф}} \frac{n}{N}.$$

где n — число периодов в цикле с регулируемым фазовым управлением; N — общее число периодов в цикле.

Тиристорные ключи предназначены для бесконтактного включения нагрузки, работающей на переменном токе. В логическом контроллере «Логикон», который используется в системах управления оборудованием, применены модули тиристорных ключей, на одной плате которых размещено четыре канала, коммутирующих цепь переменного тока напряжением 10...220 В и током 0,1...2 А. Все каналы имеют электронную защиту от перегрузок при токе 8...10 А, схему синхронизации включения при переходе напряжения через нуль, схему предотвращения ложных срабатываний при включении питания, а также схему автоматического включения любого канала после устранения перегрузки. Тиристорные ключи работают совместно с платой синхронизации. На плате формируются и поступают на все каналы тиристорного ключа импульсы: синхронизации СИ-1, сброса защиты В, управляющие сигнализацией « $f_{упр. свги}$ ».

На рис. 2.49 представлена схема одного канала модуля тиристорных ключей 4КТ220-2. При подаче на «Вход 1» напряжения логической «1», транзистор $VT1$ открывается и по светодиодам тиристоров $V9$ и $V10$, включенных в коллекторную цепь транзистора $VT1$, протекает ток. Тиристоры открываются, и в нагрузку, включен-

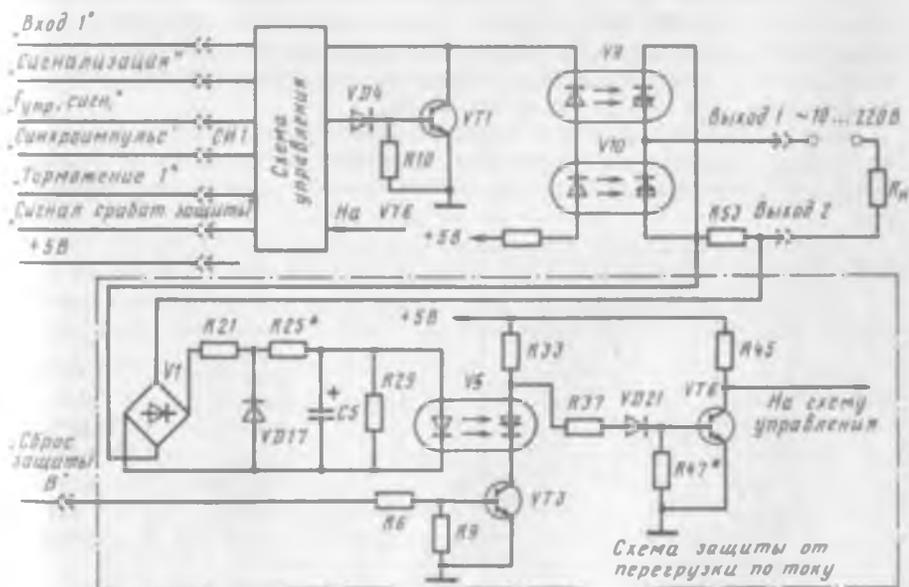


Рис. 2.49. Принципиальная схема одного канала тиристорного ключа

схеме управления в состояние «1» и транзистор $VT1$ закрывается. При подаче на «Вход 1» сигнала логического «0», а на вход «Торможение 1» сигнала логической «1» открываются тиристоры первого канала и электродвигатель вращается в одну сторону. При подаче на «Вход 2» сигнала логического «0», а на «Вход 1» логической «1» открываются тиристоры второго канала и электродвигатель вращается в другую сторону.

Транзисторный ключ предназначен для коммутации цепей постоянного тока. В логическом контроллере «Логикон» применяется модуль транзисторных ключей 8КТ24-2, который коммутирует цепи нагрузки с напряжением 12...24 В и током до 2 А. На одной плате размещается восемь каналов транзисторных ключей. Все каналы имеют электронную защиту от перегрузок при токе 2,5...3 А, схемы предотвращения ложных срабатываний при включении питания и схему автоматического включения любого канала после устранения перегрузки.

Модуль транзисторных ключей 8КТ24-2 так же, как и модуль тиристорных ключей 4КТ220-2, работает совместно с платой синхронизации.

На рис. 2.51 представлена принципиальная схема одного канала модуля транзисторных ключей 8КТ24-2. Основным коммутирующим элементом является транзистор $VT3$. При подаче на «Вход 1» канала сигнала логического «0» открывается транзистор $VT1$, затем открывается транзистор $VT2$ и через нагрузку, подключенную последовательно с резистором $R5$, протекает ток. На выходе модуля появляется сигнал «Сигнализация», наличие которого говорит о срабатывании данного канала.

Сборка В

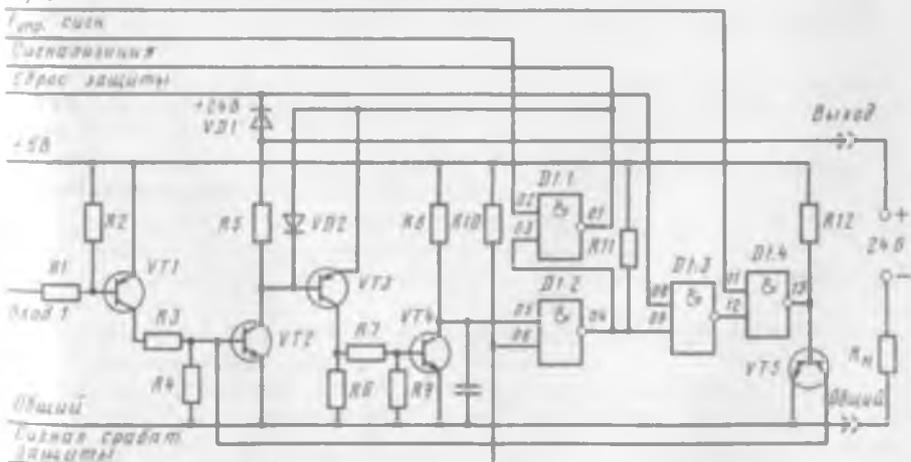


Рис. 2.51. Принципиальная схема одного канала модуля транзисторных ключей

При увеличении тока нагрузки до 2,5...3 А открывается транзистор $VT3$. Напряжение, снимаемое с коллектора транзистора $VT3$, открывает транзистор $VT4$, и на вход микросхемы $D1.2$ поступает сигнал логического «0». Микросхема $D1.1$ получает разрешение на пропускание импульсов управления сигнализацией ($f_{упр.сигн.}$), и сигнал «Сигнализация» начинает изменяться с частотой, равной частоте поступающих импульсов.

С выхода микросхемы $D1.4$ сигнал логической «1» поступает на базу транзистора $VT5$ и он открывается, а напряжение, снимаемое с коллектора транзистора $VT5$, закрывает транзистор $VT2$. При этом ток в нагрузке падает до нуля. Один раз в течение 4 с на вход микросхемы $D1.3$ поступает импульс «Сброс защиты В». В этом случае напряжением логического «0» с выхода микросхемы $D1.4$ закрываются транзисторы $VT5$ и $VT3$. Если перегрузка не устраняется, защита включается вновь после прохождения импульса. Если перегрузка устранена и транзистор $VT3$ закрыт, включается канал транзисторного ключа.

Для устранения срабатываний в момент включения питания на микросхему $D1.4$ поступает импульс «Сброс защиты В», который открывает транзистор $VT5$. Транзистор $VT5$ на время переходных процессов блокирует транзистор $VT2$.

Глава 3. СТРУКТУРА И СОСТАВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

3.1. СТРУКТУРА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ

Специальное технологическое оборудование (СТО) является сложным объектом управления и содержит большое число взаимодействующих узлов и агрегатов. Основные особенности СТО отражает его структура (совокупность узлов, агрегатов и связей между ними). В свою очередь, структура системы управления (СУ) представляет совокупность агрегатов и узлов объекта управления (ОУ), а также технических средств управления со всеми взаимными связями между ними. Выбор структуры СУ состоит в разбиении на подсистемы и обеспечении взаимодействия этих подсистем. Задача выбора структуры СУ не имеет однозначного решения, что обусловлено многообразными и часто противоречивыми требованиями (стоимость, надежность, безопасность и др.).

Сложность создания оптимальной системы управления для специального технологического оборудования микроэлектроники определяется не только исключительно высокими темпами развития СТО, многообразием его видов, но и непрерывным увеличением числа исполнительных органов и датчиков в каждой единице оборудования. С учетом этих особенностей можно выделить следующие основные требования к СУ СТО:

- 1) обеспечение безопасной работы обслуживающего персонала;
- 2) обеспечение безопасности оборудования в аварийных ситуациях;
- 3) управление оборудованием по заданной циклограмме;
- 4) диагностика состояния СУ;
- 5) диагностика состояния оборудования;
- 6) гибкость при изменении технологии;
- 7) возможность наращивания и модернизации аппаратной части СУ и СТО;
- 8) возможность работы в составе автоматизированной линии;
- 9) минимальные сроки разработки;
- 10) минимальные сроки обслуживания, ремонта.

Возможность исполнения этих требований в значительной степени определяется структурой системы и управления. Использование в СУ микроЭВМ и микропроцессорных программируемых контроллеров позволяет реализовать различные варианты СУ,

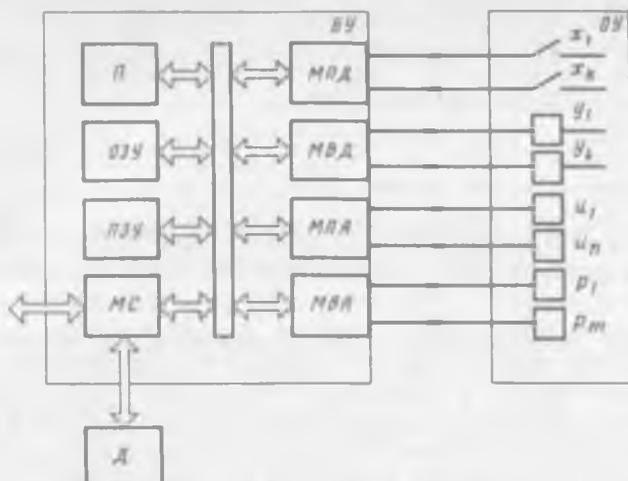


Рис. 3.1. Функциональная схема системы централизованного управления

отличающиеся составом и взаимодействием ее компонентов, направлением передачи информации и местом обработки. По последним из указанных признаков различают два варианта построения СУ: с централизованным и децентрализованным (распределенным) управлением.

Системы централизованного управления. В этих системах обработка информации производится только в микроЭВМ, для чего все технические средства СУ располагаются в блоке управления (БУ), а все датчики и исполнительные элементы — в технологическом объекте управления (ОУ). При этом сигналы с датчиков поступают в БУ, где в соответствии с алгоритмом управления формируются управляющие воздействия на исполнительные элементы. На рис. 3.1 приведена функциональная схема централизованной СУ на базе блока управления «Орион-3».

К модулям приема МПД и МПА блока управления подключены дискретные (x) и аналоговые (u) датчики СУ. Управляющие сигналы БУ через модули выдачи МВД и МВА подаются на дискретные (y) и аналоговые (p) исполнительные элементы. Для связи с оператором, а также системой управления более высокого уровня БУ используются модуль связи (МС) и дисплей (Д).

Достоинством СУ централизованного типа является возможность управления различными ОУ с помощью ограниченного комплекта аппаратных средств (только за счет варьирования числа модулей), а также простота построения СУ (не требуется аппаратных средств для связи между модулями). При этом разработчик должен предусмотреть стыковку модулей СУ с ОУ и разработать программное обеспечение.

Оценим возможности системы централизованного управления с учетом указанных выше требований. В таких системах управления выполнение любой функции осуществляется только через ЭВМ БУ, поэтому при отказе последней не гарантируется безопасность работы обслуживающего персонала и ОУ (требования 1,2), что является существенным недостатком СУ централизованного типа. Для его устранения в СУ обычно вводят дополнительные элементы (концевые выключатели, блоки аварийной

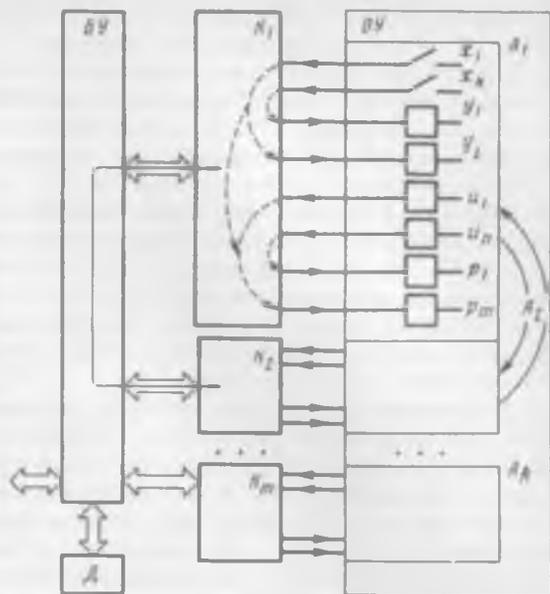


Рис. 3.2. Функциональная схема системы децентрализованного управления

сигнализации, защиты и т. п.). Кроме того, при таком построении системы управления этапы разработки ОУ, БУ и программного обеспечения выполняются только последовательно, что требует больших затрат времени на разработку СТО в целом, затрудняет его модернизацию (требования 7, 9). Модули БУ в СУ подключены к внутренней магистрали ЭВМ, поэтому могут располагаться на небольшом расстоянии от ЭВМ. Из-за этого все связи с ОУ необходимо вести на БУ, что увеличивает расход проводов, затрудняет локализацию неисправностей, увеличивает сроки ремонта и обслуживания СТО (требование 10).

Системы децентрализованного управления. Большинство указанных недостатков не имеют системы децентрализованного управления, функциональная схема которых приведена на рис. 3.2. Здесь в составе ОУ выделены агрегаты $A_1 \dots A_k$, в каждом из которых имеются дискретные и аналоговые датчики, а также дискретные и аналоговые исполнительные элементы. Каждый из агрегатов управляется отдельным контроллером (К). Связь между контроллерами, а также управление ОУ в целом осуществляются блоком управления (БУ). Дисплей служит для связи с оператором, связь с вышестоящим уровнем управления производит БУ. В децентрализованных СУ управление осуществляется при помощи группы локальных контроллеров, которые полностью или частично расчленяют функции по контролю хода технологического процесса или управление тем или иным агрегатом ОУ. Из

сравнения рис. 3.1 и 3.2 видно, что в системе децентрализованного управления имеется несколько центров обработки информации (БУ и контроллеры), а направление передачи потоков информации более сложное. Так, при слабом взаимодействии между агрегатами A_i большая часть информации может обрабатываться контроллерами K_i , каждый из которых выдает сигналы на исполнительные элементы агрегатов в зависимости от состояния датчиков и команд управления, поступающих с БУ (см. штриховые линии на рис. 3.2). При правильном выборе агрегатов основной поток информации в системе децентрализованного управления обрабатывается с помощью контроллеров, а БУ осуществляет синхронизацию их работы, а также передачу по запросу необходимых сигналов от соседних контроллеров и диагностику их состояния.

Сравнивая технические средства систем децентрализованного и централизованного управления можно заметить, что первые отличаются большей номенклатурой. Кроме того, при проектировании СУ должны быть проработаны вопросы взаимодействия контроллеров и БУ. Вместе с тем, при сравнении этих вариантов построения системы управления для одного и того же ОУ очевидно, что каждый контроллер и блок управления в децентрализованной системе обычно проще, чем при централизованном управлении. Поэтому вопрос выбора структуры СУ не имеет однозначного решения.

В МПСУ первого поколения потребитель СТО имел возможность изменять в циклограмме длительность интервалов и физические параметры процесса (температуру, давление, мощность) либо при наличии библиотеки циклограмм выбирать другую циклограмму. Однако в условиях, когда циклограмма процесса является основной изменяемой частью СТО, такое построение СУ не дает возможности перестраивать циклограмму при совершенствовании технологического процесса.

Во втором поколении МПСУ этот недостаток был устранен разработкой универсального программного обеспечения, которое в диалоговом режиме дает возможность пользователю запрограммировать любую циклограмму процесса обработки, однако при этом нет обработки сигналов по прерыванию. При этом на ЭВМ СУ возлагалось выполнение требований 2—6. Большинство из них, в том числе 1 и 2, решались программным способом в процессе задания циклограммы. Однако второе поколение МПСУ СТО имело ряд существенных недостатков:

1. Реализация универсальной программы требовала больших затрат машинного времени, цикл обработки сигналов увеличился до 1...2 с, что приводило к уменьшению производительности системы загрузки—выгрузки пластин вследствие задержек в выдаче команд на исполнительные органы и усложнению регулирования малоинерционных объектов.

2. При выходе из строя ЭВМ не всегда выполнялись указанные выше требования 1, 2 к системе управления.

Микропроцессорные СУ третьего поколения не только не имели указанных недостатков первых двух поколений, но и наиболее полно отвечали требованиям 6—10. Они реализованы по принципу децентрализованного управления и имеют следующие особенности:

а) требования 1 и 2 реализуются локальным контроллером типа «команда-команда», в жесткой памяти которого заложены все блокировки исполнительных органов СТО в аварийных ситуациях. Этот контроллер включается между входами блока управления МПСУ и исполнительными органами СТО, что обеспечивает безопасную работу оборудования в случае отказа блока управления МПСУ;

б) выполнение требований 2 и 5 возлагается на блок управления МПСУ, оснащенный ЭВМ с универсальным программным обеспечением, что позволяет пользователю задавать любую циклограмму работы СТО в пределах области безопасной работы, определенной контроллером «команда-команда»;

в) ряд систем аналогового регулирования и стабилизации физических параметров технологического процесса реализован локальными аналоговыми подсистемами. Последнее позволяет уменьшить число АЦП в блоке управления МПСУ и в итоге снизить время цикла до 1 с.

Современный этап развития МПСУ СТО характеризуется широкой номенклатурой аппаратных средств как для централизованного, так и децентрализованного управления. При этом все больше измерительных преобразователей, регуляторов и других элементов локального управления оснащаются собственными системами на базе МПК или однокристальных ЭВМ, а также постоянно увеличивается общее число датчиков и исполнительных элементов.

Эти требования все труднее выполнять с помощью систем централизованного управления, поэтому в развитии СУ СТО наблюдается устойчивая тенденция перехода к системам децентрализованного управления. Однако это не означает, что системы централизованного управления перестают использовать. Для некоторых ОУ их применение не только оправдано, но может быть и более эффективным по сравнению с системами децентрализованного управления.

3.2. МНОГОУРОВНЕВЫЕ СИСТЕМЫ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

В системах децентрализованного управления обычно бывает несколько уровней управления. На рис. 3.3 приведена функциональная схема современной системы управления единицей СТО.

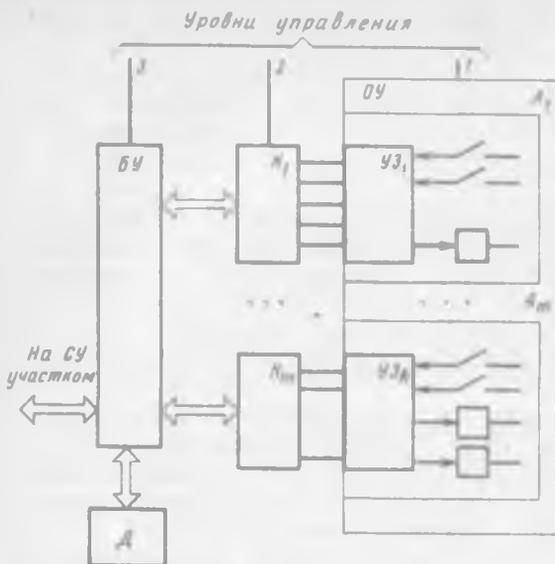


Рис. 3.3. Функциональная схема системы управления единицей СТО

В этом случае УЗ представляет собой логический контроллер, который может быть реализован на программируемой логической матрице (ПЛМ), ППЗУ или МЛК типа «Логикон-01». Расположение УЗ вблизи агрегата обеспечивает экономию проводов, так как обычно число связей УЗ с ОУ существенно превышает их число для подключения ко второму уровню управления. Последнее достигается тем, что со второго уровня управления на УЗ подается номер состояния агрегата, а состояния всех исполнительных элементов агрегата определяются путем дешифрации номера состояния. При этом обеспечивается выполнение только заранее заложенных состояний агрегата. При поступлении со второго уровня управления номера состояния, не заложенного в УЗ, обработка его не производится, тем самым исключаются аварийные состояния в агрегате при выходе из строя аппаратных средств второго и третьего уровней.

На втором уровне управления обычно используются микроконтроллеры, каждый из которых задает временную последовательность работы агрегата, обеспечивает измерение и регулирование аналоговых параметров, а также производит диагностику агрегата и узлов микроконтроллера. Результаты измерения и диагностики передаются в БУ третьего уровня.

Блок управления третьего уровня управляет работой всего ОУ, для чего на контроллеры агрегатов выдаются соответствующие команды (например, «Загрузить пластины», «Продуть реактор

Здесь показаны три уровня управления. На первом уровне обеспечивается защита агрегатов и обслуживание персонала при аварийных ситуациях. Для этого в состав агрегатов ОУ включаются устройства защиты (УЗ), которые, проанализировав сигналы, поступающие со второго уровня управления, и сигналы состояния агрегата, выполняют команды лишь тогда, когда обеспечиваются необходимые требования безопасности. Обычно в УЗ используются только дискретные

азотом» и др.). Контроллеры агрегатов переводят их в последовательность состояний агрегатов и выдают сигнал об исполнении. Блок управления третьего уровня анализирует эти сигналы, а также результаты измерений и диагностики, выдает результаты через дисплей Д оператору, на СУ участком, а также при необходимости производит статистическую обработку результатов диагностики и измерения.

Представленное выше распределение задач управления между аппаратными средствами разных уровней позволяет упростить программное обеспечение каждого уровня, а также связь с оператором.

Резюмируя приведенные выше общие рассуждения по анализу структуры СУ, можно сделать следующие выводы:

а) в случае ОУ со значительными взаимными связями между всеми датчиками и исполнительными элементами системы централизованного управления эффективнее систем децентрализованного управления;

б) для ОУ с хорошо выраженной агрегатной структурой (см. рис. 3.2) преимущества будут иметь системы децентрализованного управления. Поскольку в разработке СТО все чаще используется агрегатный (модульный) принцип конструирования, то это открывает широкие перспективы для успешного применения систем децентрализованного управления.

При этом еще раз следует подчеркнуть, что для СТО микроэлектроники из известных способов децентрализации управления (функциональной и территориальной) в наибольшей мере подходит территориальная (агрегатная) децентрализация, позволяющая существенно уменьшить объем взаимных связей в СТО и интенсивность передачи информации в каналах связи, упростить разработку и запуск СТО. При этом из-за упрощения технических средств проще и дешевле обеспечивается их резервирование.

При построении многоуровневых систем управления (см. рис. 3.3) обработка информации на третьем и более высоких уровнях для разных видов ОУ может производиться по одинаковым алгоритмам. В этом случае основные особенности агрегатов должны учитываться только на первом и втором уровнях управления, т. е. в подсистемах управления отдельных агрегатов ОУ (контроллер — устройство защиты — агрегат). Рассмотрим наиболее сложные подсистемы разных видов СТО.

3.3. ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ

Большинство технологических процессов микроэлектроники требует стабилизации температурных режимов обработки. Наиболее жесткие требования к ней предъявляются в диффузионных электропечах. В современных электропечах длина рабочей тепло-

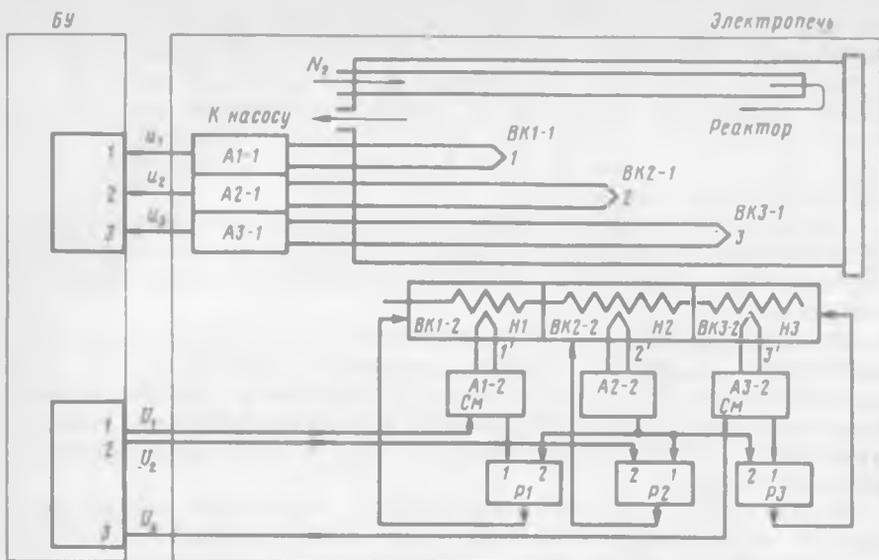
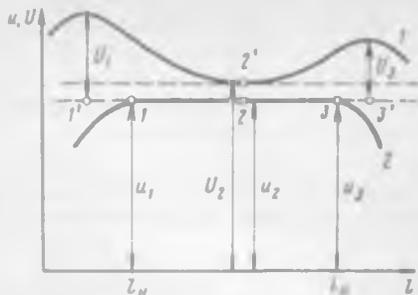


Рис. 3.4. Упрощенная схема подсистемы регулирования температуры в рабочей зоне диффузионной электропечи

вой зоны составляет 600...800 мм. При этом для обеспечения малого разброса параметров обрабатываемых пластин изменение температуры в пределах рабочей тепловой зоны не должно превышать $\pm 0,5^\circ\text{C}$ для процессов диффузии и $\pm 1...3^\circ\text{C}$ для процессов наращивания легированных слоев фосфоросиликатного стекла при пониженном давлении.

На рис. 3.4 приведена упрощенная схема подсистемы регулирования температуры в рабочей зоне электропечи. Сложность реализации этой подсистемы обусловлена многосвязностью и инерционностью объекта управления, особенно при использовании металлических реакторов. В этом случае система управления для обеспечения устойчивости и высокой точности регулирования выполняется двухконтурной. Внутренний контур образуют термоэлектрические преобразователи (ТЭП) ВК1-2...ВК3-2, установленные вблизи соответствующих секций нагревателя Н1...Н3. Температура в каждой секции устанавливается регуляторами Р1...Р3, для чего к первому входу каждого регулятора через вторичные измерительные преобразователи А1-2...А3-2 подключены ТЭП ВК1-2...ВК3-2. Для обеспечения одинаковых температурных режимов в разных точках тепловой рабочей зоны при изменении среднего уровня температуры распределение температуры вдоль тепловой зоны должно сохраняться. Для этого вторые входы регуляторов крайних секций подключены к выходу вторичного измерительного преобразователя А2-2 ТЭП централь-

Рис. 3.5. Распределение температуры нагревателя (1) и реактора (2) вдоль тепловой рабочей зоны



ной секции. В этом случае напряжение с этого преобразователя является заданием для крайних регуляторов. Поэтому при изменении температуры в центральной секции нагревателя регуляторы крайних его секций на столько же изменят температуру в этих секциях, а распределение температуры вдоль рабочей тепловой зоны останется неизменным.

Таким образом, внутренний контур обеспечивает управление распределением температуры нагревателя вдоль тепловой рабочей зоны. Вместе с тем, температура внутри реактора отличается от температуры вблизи соответствующих точек нагревателя. Поэтому внутри реактора вводятся дополнительные ТЭП ВК1-1...ВК3-1, горячие спаи которых располагаются в центре и по краям рабочей тепловой зоны реактора. Сигналы U_1, U_2, U_3 с этих ТЭП через вторичные измерительные преобразователи А1-1...А3-1 подаются на входы БУ, где преобразуются в код температуры, сравниваются с заданным значением и формируются уставки $U_1...U_3$ на внутренний контур регулирования. Тем самым поддерживается требуемое значение температуры в центре и по краям рабочей тепловой зоны. Диапазон изменения уставок $U_1, U_3—0...1$ В, а $U_2—0...10$ В. Различие в диапазонах изменения уставок обусловлено тем, что уставка U_2 задает значение температуры на всех секциях нагревателя, в том числе центральной, а уставки U_1, U_3 задают превышение температуры крайних секций нагревателя по отношению к центральной. Это обусловлено тем, что для создания одинаковой температуры во всех точках тепловой рабочей зоны крайние секции нагревателя должны иметь большую температуру, чем центральная секция (для компенсации дополнительного отвода тепла через торцевые поверхности реактора). Соотношения между $u_1...u_3$ и $U_1...U_3$ представлены на рис. 3.5, где кривая 1 показывает распределение температуры нагревателя вдоль тепловой зоны ($1', 2', 3'$ —точки установки ТЭП ВК1-2...ВК3-2), а кривая 2—распределение температуры внутри реактора ($1...3$ —точки установки ТЭП ВК1-1...ВК3-1).

Закон управления i -й секцией верхнего контура управления показывает зависимость напряжения уставки U_i от ошибки $\varepsilon_i(j)$ регулирования в момент времени $j\Delta t$:

$$U_i(j) = K_{1i}U'_i - K_{ni}\varepsilon_i(j) - \sum_j \alpha_i K_{ni}\varepsilon_i(j) - K_{di} [\varepsilon_i(j) - \varepsilon_i(j-1)]; \quad (3.1)$$

где $i = 1, 2, 3$; K_{ni} — коэффициент пропорциональности; K_{ni} — коэффициент интегрирования; K_{di} — коэффициент дифференцирования;

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & \text{при } |\varepsilon_i(j)| \leq B_i; \\ 0 & \text{при } |\varepsilon_i(j)| > B_i; \end{cases}$$

$B_i = \text{const}$; Δt — время между двумя измерениями температуры; U'_i — напряжение, полученное на выходе вторичного преобразователя A_{1-2} при температуре горячего спая ТЭП, равной заданной T_{i3} .

Закон управления и формирования сигнала ошибки верхнего контура управления для крайних и центральной секций различен. При условии $K_{11} = K_{13} = 0$, $K_{12} = 1 \dots 1,5$

$$\varepsilon_1(j) = T_1(j) - T_2(j) - (T_{13} - T_{23}); \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_2(j) = T_2(j) - T_{23};$$

$$\varepsilon_3(j) = T_3(j) - T_2(j) - (T_{33} - T_{23}). \quad (3.3)$$

Как следует из (3.2) и (3.3), заданием для крайних секций является температура в центральной точке рабочей зоны реактора, т. е. повторяется взаимосвязь систем управления крайних и центральной секций, как и в нижнем контуре управления температурой.

Закон управления (3.1) имеет ряд особенностей по сравнению с широко распространенным пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД)-законом. Во-первых, введена составляющая U'_i , пропорциональная заданной температуре T_{i3} , во-вторых, интегральная составляющая включается только при уменьшении ошибки регулирования до B_i (в этом случае $\alpha_i = 1$). Первая особенность обеспечивает установление температуры секций нагревателя практически равной заданной температуре соответствующих точек рабочей тепловой зоны внутри реактора только за счет регуляторов внутреннего контура, в том числе при $K_{ni} = K_{ni} = K_{di} = 0$. Поскольку рабочая тепловая зона внутри реактора отделена от нагревателей только стенкой реактора, значения температуры в соответствующих точках реактора будут близкими к заданной. Так, экспериментально установлено, что в диапазоне температуры 350...500 С для электропечей с металлческим реактором разница составляет 15...40 С, а в диапазоне 700...1100 С и с кварцевым реактором — 10...30 С. Это позволяет в более широких пределах изменять постоянные коэффициенты закона управления, получать хорошие динамические характеристики системы.

Вторая особенность закона регулирования (3.1) состоит в изменении его структуры (исключении интегральной составляющей), что позволяет выбором параметра B_i и коэффициента интегрирования устранить перерегулирование при малом времени установления температуры.

В (3.1) для удобства формирования П-, ПД-законов коэффициент при интегральной составляющей введен в виде множителя. При этом постоянная интегрирования закона рассчитывается как $T_{ni} = \Delta t / K_{ni}$, аналогично $T_{di} = K_{di} \Delta t$.

Последние выражения полезны при настройке системы, когда первые приближения T_{ni} , T_{di} могут быть определены по характеристикам объекта регулирования.

В рассмотренной подсистеме (см. рис. 3.4) в качестве регуляторов Р1...Р3 внутреннего контура используются регуляторы типа ПР.ТРА. Однако это не исключает ее реализацию полностью дискретными аппаратными средствами. При этом закон управления внутренними контурами также выбирается в виде (3.1).

3.4. ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Отличительная черта процесса плазмохимической обработки (ПХО) — возможность получения информации о состоянии обрабатываемых полупроводниковых пластин в процессе обработки, что позволяет непосредственно управлять этим процессом, т. е. формировать сигнал окончания обработки. Эту задачу решает подсистема определения момента окончания процесса ПХО. Причем по мере совершенствования технологии возрастают требования к точности работы подсистемы определения окончания процесса обработки. Поэтому вопросу построения данной системы в ПХО всегда уделялось большое внимание. В настоящее время применяется несколько методов определения окончания обработки, отличающихся используемыми физическими эффектами: эмиссионная спектрометрия — спектральный метод; лазерная интерферометрия — лазерный метод.

Принцип работы спектральных устройств фиксации момента окончания процесса поясняется рис. 3.6, а. Здесь в реакторе 1 между электродами 2 возбуждается плазменный разряд. При этом в реактор подаются газообразные реагенты 3, а насосом 4 из реактора удаляются продукты реакции. Под воздействием плазмы молекулы реагентов и продуктов реакции возбуждаются и в эмиссионном спектре появляются соответствующие спектральные составляющие. Очевидно, интенсивность излучения этих составляющих будет зависеть от концентрации составляющих, степени ионизации и производительности насоса.

Временная зависимость интенсивности излучения отдельных составляющих в процессе обработки показана на рис. 3.6, б. Здесь

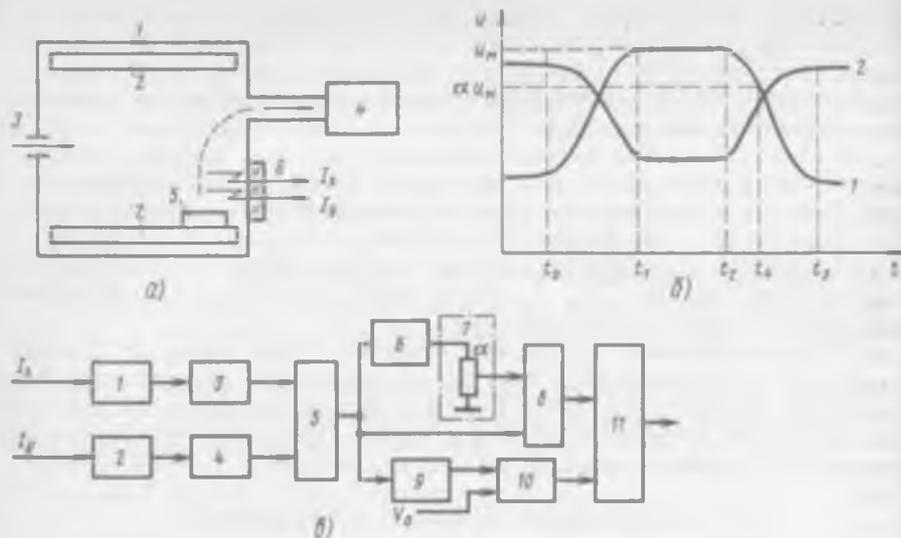


Рис. 3.6. К методу спектрального анализа:

а принцип работы, *б* временная зависимость интенсивности излучения; *в* функциональная схема устройства управления

кривая 1 показывает изменение интенсивности спектральной составляющей продукта реакции, получаемого при обработке пластин в плазме. В момент времени t_0 в реакторе возбуждается плазма и начинается процесс обработки. При этом возникают продукты реакции, которые откачиваются насосом. В момент времени t_1 наступает динамическое равновесие, и процесс обработки идет практически равномерно до момента t_2 , когда на некоторых пластинах обработка, например травление, заканчивается, поэтому интенсивность составляющей начинает падать и в момент t_3 стабилизируется. Таким образом, для эмиссионного спектра продуктов реакции признаком окончания процесса обработки является стабилизация интенсивности излучения.

Временное изменение интенсивности излучения, возникающее при использовании спектральных составляющих эмиссионного спектра реагентов, расходуемых в процессе обработки, представлено кривой 2 на рис. 3.6. б. Как следует из сущности спектрального метода, интенсивность излучения будет зависеть не только от стадии обработки, но и расхода реагентов, степени ионизации и колебания давления в реакторе, что создает дополнительные трудности при обработке сигналов.

Значительно уменьшить воздействие этих факторов на результат позволяет двухканальное построение устройства управления, один из вариантов которого показан на рис. 3.6. в. Здесь одновременно измеряются интенсивности излучения двух спект-

ральных составляющих, одна из которых I_x (рис. 3.6, *a*) зависит от стадии процесса обработки, а вторая I_y — только от возмущающих факторов. Эти составляющие выделяются фильтрами 1 и 2, усиливаются усилителями 3 и 4, затем подаются на устройство масштабирования (деления) 5. Если спектральные составляющие выбраны правильно, то на выходе устройства 5 напряжение практически не зависит от возмущений мощности, подводимой к реактору, и колебаний давления.

Дальнейшая обработка сигнала заключается в следующем. Схема выделения максимума 6 запоминает максимальное значение напряжения u_{\max} , которое через потенциометр 7 с коэффициентом передачи α подается на компаратор 8. При уменьшении входного сигнала до величины αu_{\max} компаратор 8 срабатывает. Одновременно с этим работает схема 9 измерения скорости изменения напряжения, компаратор 10 сравнивает текущее значение с пороговым значением V_0 . Сигналы с компараторов 8 и 10 подаются на логическую схему 11, которая выдает сигнал окончания обработки при одновременном срабатывании компараторов в течение некоторого заданного времени Δt .

Применение схемы выделения максимума 6 и компаратора 8 исключает срабатывание устройства в моменты времени t_0 , t_1 , t_2 (см. рис. 3.6, *b*), когда значение скорости изменения меньше порогового, а процесс обработки еще не закончен. Управление процессом, представленное кривой 2 (см. рис. 3.6, *b*), производится аналогично, при этом вместо отношения I_x/I_y берут I_y/I_x .

Чувствительность спектрального метода зависит от суммарной площади обрабатываемых пластин, поэтому он широко применяется в ПХО групповой обработки. При уменьшении суммарной площади обрабатываемой поверхности интенсивность излучения спектральных составляющих, а также величин спада сигнала от максимума существенно уменьшается, что снижает эффективность метода. Достоинством спектрального метода управления ПХО является простота реализации, независимость результатов от топологии обрабатываемых слоев.

Схема управления процессом ПХО с помощью лазерного излучения представлена на рис. 3.7, *a* на примере травления слоя алюминия 1 (рис. 3.7, *a*) в окнах, свободных от фоторезиста 2. Слой алюминия нанесен на слой оксида кремния 3, расположенный на полупроводниковой подложке 4. На обрабатываемую поверхность направляется луч лазера и измеряется интенсивность отраженного луча 1. Отраженный луч содержит составляющие, полученные в результате отражения от поверхности фоторезиста алюминия и от плоскости раздела фоторезиста и алюминия.

Оптическая разность хода этих составляющих зависит от коэффициента преломления и толщины слоев. Поэтому при их изменении (например травлении) она будет изменяться. Следовательно, будет изменяться и интенсивность отраженного луча, что

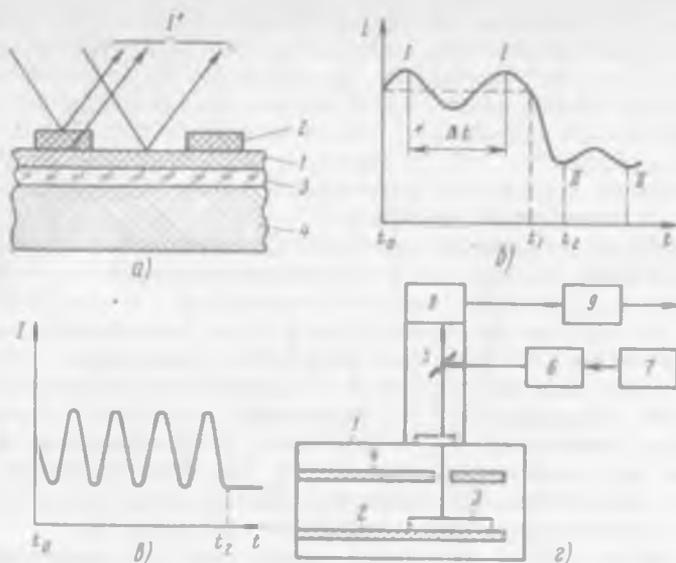


Рис. 3.7. Схема лазерного управления процессом:

а — принцип работы, б, в — временные зависимости светового потока при травлении алюминия и поликремния, г — функциональная схема устройства управления

обусловлено интерференцией. На рис. 3.7, б показано изменение интенсивности отраженного луча от времени травления при обработке структуры. На участке $t_0 - t_1$ происходит травление алюминия, а также некоторое подтравливание фоторезиста. Разность хода составляющей, отраженной от поверхности раздела алюминия и фоторезиста, зависит от толщины слоя фоторезиста, поэтому на зависимости будут минимумы и максимумы. За время Δt между точками I' изменение толщины составит $\Delta h = \lambda / (2n)$, где λ — длина волны лазера; n — коэффициент преломления фоторезиста.

За период времени $t_1 - t_2$ толщина слоя уменьшается, он становится прозрачным, а потом весь стравливается. Поэтому интенсивность составляющей, полученной за счет отражения от слоя алюминия, быстро падает. Вместе с ней уменьшается и интенсивность отраженного луча. Обработка заканчивается в момент времени t_2 после резкого спада интенсивности луча при уменьшении скорости изменения интенсивности до нуля.

При продолжении обработки за слоем алюминия будет подтравливаться слой оксида кремния. В этом случае, как и в период времени $t_0 - t_1$, будет наблюдаться интерференция, обусловленная изменением оптической разности хода составляющей, полученной отражением от поверхности раздела «подложка — оксид кремния».

Изменение интенсивности отражаемого луча существенно зависит от оптических свойств обрабатываемого материала, а также состояния поверхности. На рис. 3.7, в приведена временная зависимость интенсивности отраженного луча при травлении слоя поликремния на кремниевой подложке. В этом случае травление заканчивается в момент времени t_2 при уменьшении скорости изменения интенсивности отраженного луча до нуля.

Функциональная схема устройства управления ПХО показана рис. 3.7, з. Здесь в реакционной камере 1 на нижнем электроде 2 лежит обрабатываемая полупроводниковая подложка 3, на которую через отверстие в верхнем электроде 4, полупрозрачное зеркало 5 и расширитель 6 направляется лазерный луч 7. Отраженный луч через полупрозрачное зеркало 5 падает на фотозлемент 8, где преобразуется в напряжение постоянного тока, которое подается в устройство обработки 9.

Достоинство лазерного управления ПХО заключается в том, что интенсивность отраженного луча не зависит от параметров плазмы и давления в реакторе. Кроме того, в отличие от спектрального метода лазерный является локальным. Он позволяет управлять обработкой той части пластины, куда направлен луч лазера. Лазерный метод дает также информацию о глубине травления (по числу пройденных максимумов). Однако алгоритм обработки временной зависимости интенсивности в данном случае сложнее, чем при спектральном методе. Обычно обработку ведут путем измерения скорости изменения интенсивности. В некоторых случаях управление может производиться по тому же алгоритму, что и в спектральном методе.

3.5. ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОВЫМИ ПОТОКАМИ

Большинство технологических процессов микроэлектроники использует реагенты в газообразном состоянии. Поэтому управление газовыми потоками в СТО является важной задачей. При ее решении необходимо учитывать следующие особенности:

объект управления является малоинерционным;

управление производится как дискретными исполнительными органами, так и аналоговыми регуляторами;

газовая система современного СТО обычно включает элементы вакуумной подсистемы, что усложняет СУ.

Эти особенности накладывают ряд ограничений на выбор структуры СУ. Так, из-за малой инерционности объекта управления практически исключается применение систем централизованного управления. Поэтому во всех подсистемах управления газовыми потоками заданное значение расхода реагентов поддерживается с помощью аналоговых регуляторов расхода.

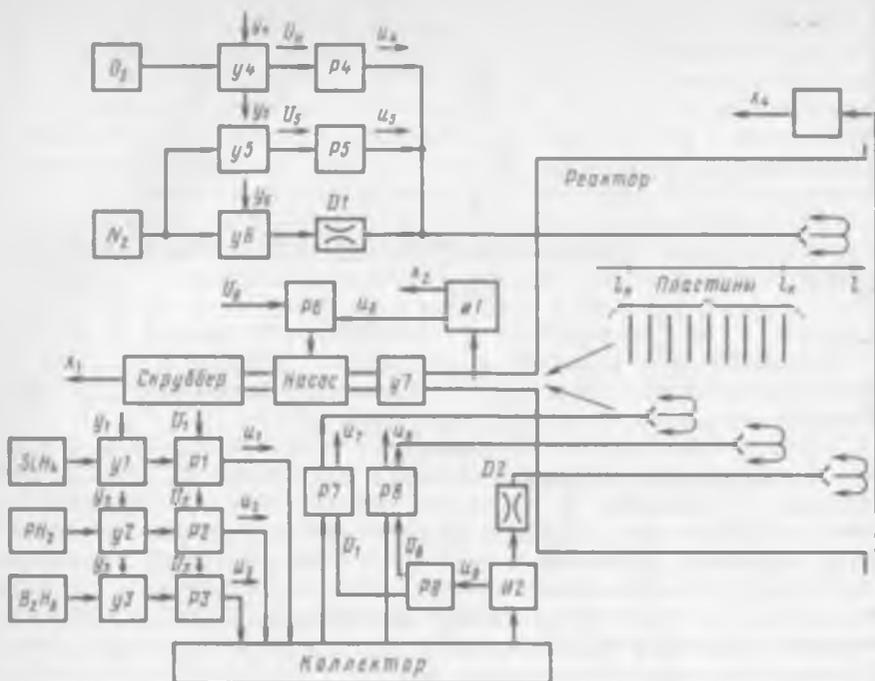


Рис. 3.8. Упрощенная функциональная схема подсистемы управления газовыми потоками установки осаждения легированных слоев оксида кремния при пониженном давлении

На рис. 3.8 приведена упрощенная функциональная схема подсистемы управления газовыми потоками установки осаждения легированных слоев оксида кремния при пониженном давлении. Здесь в рабочей зоне реактора $I_1 - I_2$ расположены кремниевые пластины. Объем реактора откачивается насосом через вакуумный затвор y_7 . Давление в реакторе измеряется вакууметром И1 и регулируется регулятором P6 в соответствии с заданием U_6 , поступающим от блока управления.

Газообразные реагенты подаются в рабочую зону реактора через систему клапанов $y_1 \dots y_6$ и аналоговые регуляторы P1...P5, P7, P8. Кислород и азот подаются по одной длинной форсунке, а силан SiH_4 , фосфин PH_3 и диборан B_2H_6 предварительно смешиваются в коллекторе и подаются в реактор по нескольким форсункам разной длины. Регуляторами P7...P9 поддерживается заданное отношение расходов газовой смеси форсунок к расходу через самую длинную форсунку. Это позволяет управлять распределением концентрации реагентов вдоль рабочей зоны реактора.

На рис. 3.9, а показано распределение концентрации реагентов вдоль рабочей зоны при подаче газовой смеси по одной (кривая 1)

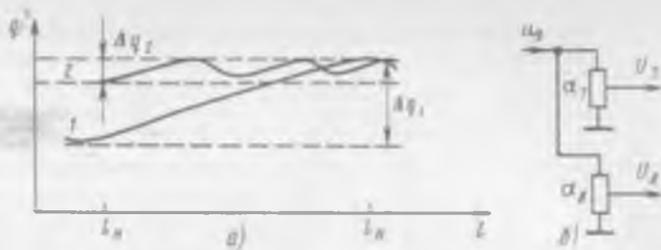


Рис. 3.9. Управление газовыми потоками:

а — распределение концентрации смеси реагентов по длине рабочей зоны, *б* — пример реализации регулятора Р9 отношения расходов газовой смеси

и трем (кривая 2) форсункам. Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что неравномерность концентрации распределенной подачи реагентов во втором случае значительно уменьшилась ($\Delta q_2 \ll \Delta q_1$). Следовательно, меньше будет и разброс параметров осаждаемых слоев на краях рабочей зоны реактора. Управление распределением концентрации реагентов вдоль рабочей зоны обеспечивается регуляторами Р7...Р9. В простейшем случае регулятор Р9 может быть реализован так, как показано на рис. 3.9, б. Здесь напряжение u_9 с датчика расхода И2 самой длинной форсунки подается в качестве задания на входы регуляторов расхода газовой смеси остальных форсунок: $U_7 = \alpha_7 u_9$; $U_8 = \alpha_8 u_9$.

После окончания переходного процесса в форсунках значения потоков составят

$$P_7 = K_7 U_7; \quad P_8 = K_8 U_8; \quad P = K u_9,$$

где K , K_7 , K_8 — константы.

Подставив в последнюю систему уравнений выражения для U_7 и U_8 и поделив первые два уравнения на третье, получим

$$P_7/P = \alpha_7 K_7 / K; \quad P_8/P = \alpha_8 K_8 / K.$$

Из последних выражений видно, что отношение газовых потоков P_7 , P_8 форсунок к потоку P самой длинной форсунки задается коэффициентами α_7 , α_8 передачи потенциометров (рис. 3.9, б) и не зависит от суммарного расхода смеси реагентов. Это обеспечивает независимое управление составом смеси реагентов и распределение их концентрации вдоль рабочей зоны в широком диапазоне изменения расходов каждого реагента.

Рассмотренные аналоговые регуляторы работают совместно с дискретными исполнительными элементами (клапанами), которые подключают их к источникам соответствующих реагентов. Возможные взаимодействия всех исполнительных элементов подсистемы обычно задают, используя таблицу состояния исполнительных элементов, необходимых для проведения технологического процесса либо его подготовки. Как видно из табл. 3.1, из всех

Таблица 3.1 Рабочие состояния подсистемы управления газовыми потоками

Состояние подсистемы	Состояние исполнительных элементов																	
	дискретных							аналоговых										
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9		
Загрузка																		
Откачка							0											
Продувка							0	0										
Проверка натекания																		
Подготовка 1						0	0					*	*	*	*	*	*	
Подготовка 2				0	0	0	0		*			*	*	*	*	*	*	
Осаждение 1	0	0		0	0	0	0	*	*			*	*	*	*	*	*	
Осаждение 2	0		0	0	0	0	0	*		*	*	*	*	*	*	*	*	
Осаждение 3	0	0	0	0	0	0	0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Напуск							0											

Примечание: 0 исполнительный элемент включен (клапан открыт); * разрешается работа регулятора

возможных комбинаций семи дискретных исполнительных элементов и девяти аналоговых используются только десять, что является еще одним подтверждением выводов, сделанных в § 3.2.

При проведении технологического процесса в подсистеме (см. рис. 3.8) могут возникнуть отказы некоторых элементов, обеспечивающих нормальное проведение процесса (прекращение подачи воды, отключение нагрева в скруббере, отсутствие вытяжной вентиляции, разгерметизация реактора и др.). В этом случае некоторые из состояний подсистемы, заданные в табл. 3.1, могут стать опасными для обслуживающего персонала, привести к порче оборудования и другим нежелательным последствиям. Для их исключения подсистема снабжается дополнительными датчиками x_1 , x_2 , x_4 и устройствами защиты, встраиваемыми в подсистему (см. рис. 3.3). Работа устройства защиты описывается табл. 3.2, определяющей поведение подсистемы в случае аварийных состояний.

Так, для рассмотренной подсистемы при отсутствии воды, нагрева или вытяжки в скруббере ($x_1 = 0$) исполнительные элементы (клапаны) $Y_1 \dots Y_4$ не должны включаться, так как из-за нарушения режима работы скруббера токсичные реагенты не

Таблица 3.2. Аварийные состояния подсистемы управления газовыми потоками

Состояние датчиков			Состояние исполнительных элементов							Примечание
x_1	x_2	x_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	
0	X	X	1	1	1	1	X	X	X	Отсутствие воды, вытяжки, нагрева в скруббере Разгерметизация реактора Не закрыта крышка реактора
X	0	X	1	1	1	1	X	X	X	
X	X	0	1	1	1	1	1	1	1	

Примечание: 0 включенное состояние, 1 выключенное состояние, X любое состояние

будут утилизированы и через вытяжную вентиляцию попадут в атмосферу и зону нахождения обслуживающего персонала. При разгерметизации реактора ($x_2=0$ в течение времени $T=const$) необходимо отключить все исполнительные элементы.

Устройство защиты можно выполнить различными способами. Однако из-за высоких требований по надежности наиболее подходящими вариантами являются устройства с «жесткой» логикой, например «Логикон-01», а также контроллеры на ПЗУ или программируемых логических матрицах.

На рис. 3.10 приведен пример реализации устройства защиты для подсистемы, представленной на рис. 3.8. Дешифратор состояний подсистемы $D1$ реализует табл. 3.1, а элементы $D2...D10$ и таймер T — табл. 3.2. Дополнительный элемент $D11$ формирует сигнал «Авария» для контроллера более высокого уровня, а также звуковой сигнализации. Для обеспечения высокой степени безопасности устройства защиты должно иметь также надежный источник питания. В особо ответственных подсистемах используют источник питания с резервированием.

Таблицы 3.1 и 3.2 обычно составляются при проектировании подсистемы разработчиком, что обеспечивает квалифицированный анализ рабочих и аварийных состояний. Этим гарантируется высокая безопасность работы подсистемы и обслуживающего персонала. В процессе эксплуатации табл. 3.1 и 3.2 могут дополняться и уточняться. В этом случае при изменении рабочих состояний в табл. 3.1 перепрограммируется ПЗУ $D1$ (рис. 3.10), а при изменении аварийных состояний в табл. 3.2 корректируются цепи защиты (рис. 3.10). Для удобства обслуживания ПЗУ целесообразно разбивать на две области. Первая из них используется при автоматической работе подсистемы и доступна оператору и наладчику. Вторая используется при подготовке подсистемы к работе в режиме наладки и доступна только наладчику, имеющему специальное разрешение на проведение работ.

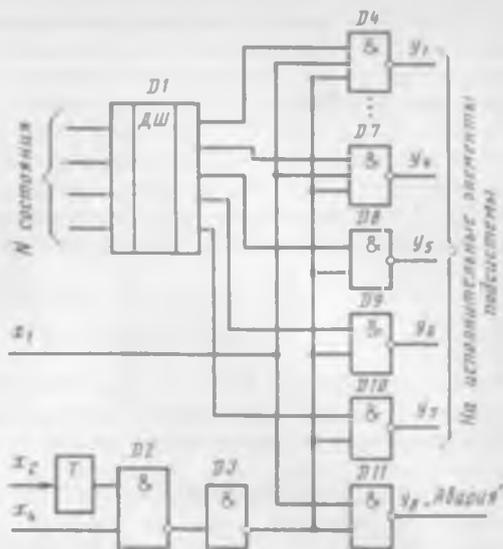


Рис. 3.10. Пример реализации устройства защиты подсистемы управления газовыми потоками с помощью «жесткой» логики

В заключение отметим, что ограничение области возможных состояний подсистемы, только указанных в табл. 3.1 и 3.2, практически не уменьшает возможности подсистемы. Во-первых, при использовании для кодирования состояний 8-разрядного слова может быть до 256 рабочих состояний и 256 состояний для наладки, что значительно перекрывает потребности современных подсистем СТО. Во-вторых, запас памяти позволяет ввести в табл. 3.1 практически все безопасные и физически оправданные состояния подсистемы, расширяющие область ее использования.

3.6. ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

С развитием СТО и совершенствованием технологии микроэлектроники постоянно возрастает значение транспортных механизмов. В настоящее время транспортные механизмы используются как при перемещении обрабатываемых пластин в пределах одной единицы СТО (из зоны складирования в зону обработки), так и между разными единицами СТО. Эти два типа транспортных механизмов имеют существенные различия. Первый из них является принадлежностью установки, отражает ее специфику и, как правило, имеет малые перемещения обрабатываемых пластин. Транспортные механизмы второго типа являются более универсальными, отличаются большим перемещением обрабатываемых пластин. Специфика транспортных механизмов обуславливает особенности построения их систем управления: транспортные механизмы первого типа являются подсистемой установки, в то время как транспортные механизмы второго типа имеют свою собственную и достаточно сложную систему управления.

Несмотря на указанные различия системы управления транспортными механизмами разных типов имеют много общего. В ОУ преобладают дискретные датчики и исполнительные элементы. Из-за большой скорости работы и высокой точности фиксации механизмов требуется малое время реакции СУ. Поэтому построение этих двух видов СУ имеет много общего. Обычно они строятся на основе программируемых контроллеров, и только самые простые СУ первого типа выполняются на «жесткой» логике (ПЛК типа «Логикон-01»).

Так, фирма ASM комплектует диффузионное оборудование системами загрузки — выгрузки, каждая из которых обслуживает одну четырехреакторную диффузионную электропечь. Система загрузки — выгрузки имеет три степени свободы и выполняет следующие операции:

- загрузку и выгрузку лодочек с пластинами из реактора;
- перегрузку лодочек с пластинами из реактора в реактор;

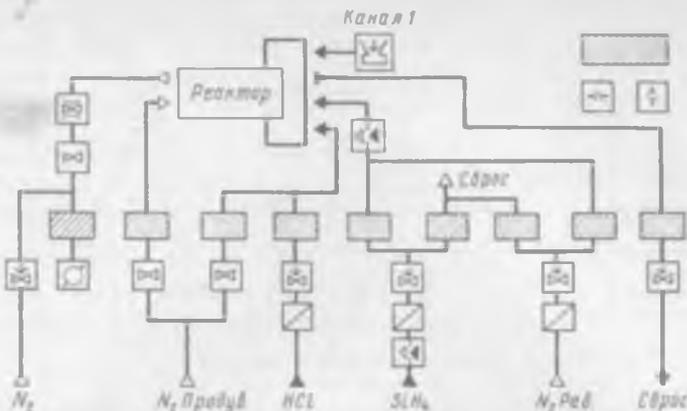


Рис. 3.11. Мнемосхема газовой системы одного реактора диффузионной установки

транспортирование лодочек с пластинами из реактора в зону складирования и обратно;

перегрузка пластин из кассеты в лодочку и обратно;

регулирование скорости загрузки — выгрузки.

Применение такой системы позволяет исключить участие человека на этих операциях, что повышает выход годных схем. Описанная система имеет собственную СУ на нескольких микропроцессорных контроллерах.

3.7. ПОДСИСТЕМЫ ОТОБРАЖЕНИЯ И ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Важное место в МПСУ занимают устройства отображения информации, позволяющие операторам и технологам программировать и контролировать ход процессов. В случае, когда результаты технологического процесса необходимо представить в виде контрольного документа, МПСУ имеют в своем составе устройство документирования или обеспечивают передачу информации на вычислительный комплекс, оснащенный требуемыми устройствами.

Среди устройства отображения наибольшее распространение находят дисплеи, видеомониторы, мнемосхемы. В последние годы начинают появляться устройства акустического ввода и вывода информации: анализаторы и синтезаторы речи.

Самыми простейшими устройствами отображения информации в микропроцессорных системах управления являются мнемосхемы, на которых с помощью ламп накаливания или светодиодов отображаются состояния устройств и механизмов установки. На рис. 3.11 приведена мнемосхема газовой системы реактора диффузионного оборудования. При подаче на мнемосхему от микро-

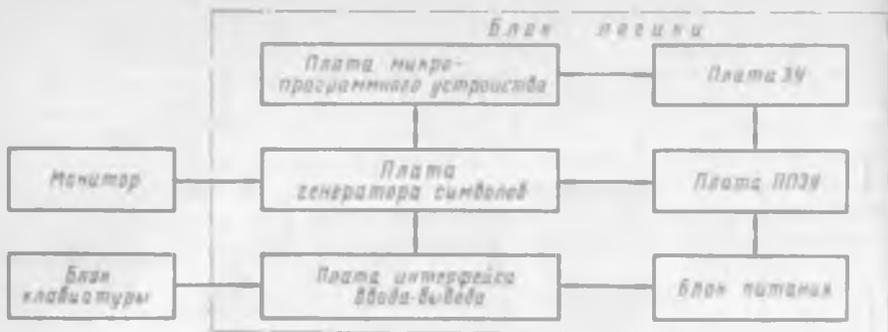


Рис. 3.12. Структурная схема символьного дисплея

процессорной системы управления сигналами, характеризующих положение элементов газовой системы, можно наглядно представить состояние оборудования. Более информативными являются устройства отображения, выполненные на цифровых индикаторах, например в программаторе «Орион-1» или газоразрядных панелях ИГП, которые, обладая относительно небольшими габаритными размерами, высокой надежностью, встроенными системами управления, дают возможность представить оператору технологического оборудования большой объем алфавитно-цифровой информации.

Устройствами ввода—вывода информации с широкими возможностями для операторов являются дисплеи, обеспечивающие как отображение данных, так и воздействие оператора на отображаемую и обрабатываемую информацию.

По форме представления информации на экране дисплеи делятся на символьные и графические. Характеристики дисплеев зависят от способа формирования отображения. При растровом (телевизионном) методе регистрирующий орган, например луч электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), последовательно направляется во все участки рабочего поля экрана, образуя растр. В точках пересечения растра с точками вводимого изображения осуществляется подсвет. Если интенсивность подсвета каждой точки может широко изменяться в соответствии с цифровыми кодами, то растровый дисплей становится полутоновым.

Общение оператора с МПСУ производится с помощью клавиатуры. Наибольшее применение в технологическом оборудовании получил символьный дисплей на базе ЭЛТ диагональю 31 см, структурная схема которого представлена на рис. 3.12.

Большой информативностью по сравнению с символьными дисплеями обладают цветные дисплеи, на экране которых можно отображать мнемосхемы оборудования, выделять цветом параметры, значения которых вышли за допустимые пределы и т. п.

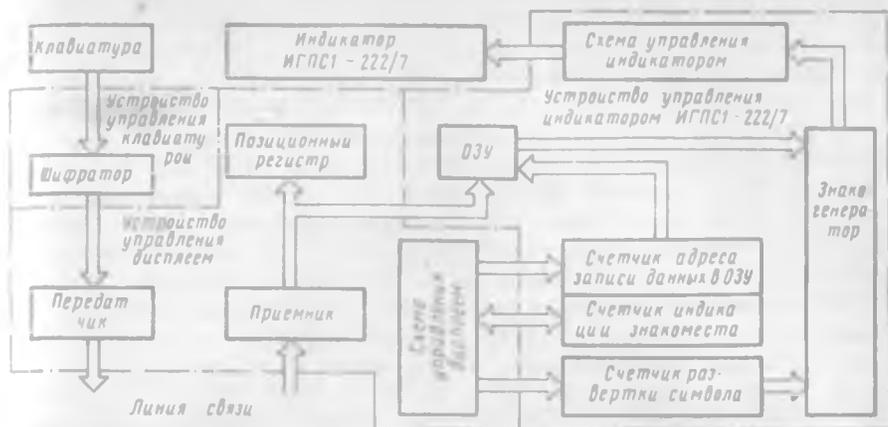


Рис. 3.13. Структурная схема дисплея ДО-32

При работе технологического оборудования в составе линий и автоматических комплексов не требуется иметь на каждой единице оборудования дисплей на базе ЭЛТ, но пост управления линией должен содержать необходимые средства отображения и документирования информации. Для контроля за состоянием подсистем оборудования может быть применен более простой дисплей, в котором в качестве устройства отображения используется индикатор ИГПС1-222/7, позволяющий отображать символьную информацию длиной в 32 знака. На лицевой панели дисплея расположена индикационная панель и функциональная клавиатура, имеющая 21 кнопку, с помощью которых можно обеспечить просмотр отображаемой информации, программирование и управление оборудованием. Структурная схема однострочного дисплея ДО-32 приведена на рис. 3.13.

Устройство управления дисплеем осуществляет: синхронизацию работы всех частей дисплея; прием кодов символов с клавиатуры и передачу их в линию связи; прием кодов символов из линий связи и передачу их для хранения в позиционный регистр или в устройство управления индикатором ИГПС1-222/7. Линия связи выполнена в виде стандартной 20-миллиамперной токовой петли. Передатчик и приемник линии связи гальванически развязаны с питанием дисплея и представляют собой стабилизаторы тока. Это позволяет исключить ручную регулировку тока при работе на линиях разной длины.

Питание передатчика и приемника может осуществляться от изолированного источника питания напряжением 9 ± 2 В при токе до 40 мА.

Устройство управления индикатором ИГПС1-222/7 предназначено для хранения кодов символов, преобразования их, усиления и вывода совместно с сигналом управления на индикатор

ИГПС1-222/7. Оно содержит ОЗУ на 32 разрядных слова, знакогенератор, счетчики адреса и знакоместа, усилители управления анодами и катодами индикатора ИГПС1-222/7, преобразователь напряжения для питания усилителей и линий связи.

Устройство управления клавиатурой предназначено для выработки кода, соответствующего нажатой кнопке, и stroba записи. При приеме информации из линии связи на вход дисплея поступает байт информации, который либо записывается в позиционный регистр дисплея и отображается на его светодиодах, либо поступает в ОЗУ самого дисплея. Устройство управления дисплеем формирует с помощью счетчика адреса записи данных в ОЗУ ячейки памяти, в которые будет записана поступающая информация, а с помощью счетчика адреса индикации знакоместа — адрес того знакоместа на экране индикатора, в которое будет записана информация. Информация из ОЗУ поступает на знакогенератор, который осуществляет преобразование принятой информации с помощью схемы управления индикатором в последовательность из пяти слов для развертки и получения графического изображения знака на экране газоразрядного индикатора. Аналогично происходит прием из линии связи следующего байта информации и его отображение на экране газоразрядного индикатора.

При нажатии одной из клавиш клавиатуры на выходе шифратора формируется двоичный код, соответствующий нажатой кнопке. Этот код через передатчик дисплея поступает в последовательный канал связи и одновременно на ОЗУ самого дисплея. Запись информации в ОЗУ и ее отображение на индикаторе дисплея происходят аналогично, как и при работе дисплея в режиме приема информации.

В последние годы в системах управления технологическим оборудованием, построенных на основе микропроцессоров или микроЭВМ, начинают применяться акустические средства ввода — вывода информации.

Мультиплексорный автомат распознавания и синтеза речи («Марс-1») осуществляет автоматическое отождествление вводимого речевого сигнала с заранее выбранными сигналами (распознавание речи) и создает искусственные речевые сигналы (синтез речи). При распознавании речи обеспечивается сравнение изолированно произнесенных команд с предварительно сформированным словарем, в связи с чем организуемый диалог ограничен подмножеством слов русского языка, которое составляет словарь речевых команд.

Синтез речи основан на моделировании процессов естественного речеобразования и позволяет синтезировать связную речь по произвольному орфографическому тексту, благодаря чему к организуемому диалогу не предъявляется словарных ограничений.

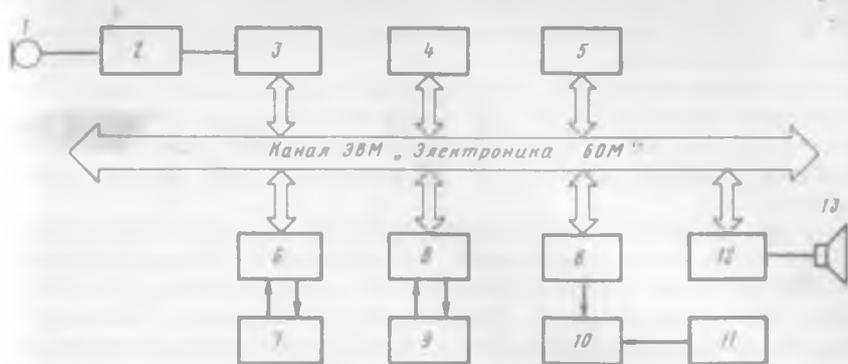


Рис. 3.14. Структурная схема устройства «Марс-1»:

1 — микрофон; 2 — анализатор речевых сигналов; 3 — процессор динамического программирования; 4 — оперативное запоминающее устройство; 5 — центральный процессор; 6 — последовательный интерфейс; 7 — управляющая ЭВМ; 8 — модуль управления накопителем на магнитной ленте; 9 — накопитель на магнитной ленте; 10 — дисплей; 11 — клавиатура; 12 — формантный синтезатор речевых сигналов

Структурная схема устройства «Марс-1» показана на рис. 3.14. На основе групповых признаков, получаемых из описания речевого сигнала в анализаторе речевых сигналов (АРС), и работы процессора динамического программирования (ПДП) в качестве решения принимается одна из пяти гипотез: реализация тождественна одному из эталонов заданного словаря, который хранится во внешнем долговременном запоминающем устройстве и записывается в ОЗУ (распознавание); реализация не принадлежит заданному словарю (произнесена команда, не входящая в заданный словарь); реализация равноудалена от нескольких эталонов заданного словаря (отказ от распознавания); реализация принадлежит классу речевых сигналов, но не входит в заданный динамический диапазон (команда произнесена тихо); реализация не принадлежит классу речевых сигналов (помеха).

Алгоритм синтеза представляет собой композицию алгоритмов отдельных этапов преобразования текстовой информации. Получаемые в результате преобразования орфографического текста фонемные коды элементов текущего слога являются исходной информацией для формирования в синтезаторе речевых сигналов параметров речевого сигнала.

Программа принятия решения при распознавании речи и формирование параметров управления формантным синтезатором при синтезе речи реализуются центральным процессором (ЦП), в качестве которого использован процессор М2 микроЭВМ «Электроника-60М».

Акустические устройства ввода — вывода информации имеют по сравнению с традиционными устройствами ряд специфических достоинств, которые расширят уже в ближайшее время сферу их применения:

сокращенное количество передаваемой знаковой информации с помощью дисплея;

уменьшенный объем визуального контроля оператора;

контакт с микроЭВМ при удалении человека от дисплея на расстояние до десятков метров, что важно при разделении производственных помещений на «чистую» зону и зону обслуживания.

Среди устройств документирования в составе микропроцессорных устройств управления применяются термопечатающие устройства. Они обладают широкими возможностями по организации печати знаковой и графической информации, бесшумны и просты в эксплуатации. Связь всех устройств с микроЭВМ производится через стандартные интерфейсы: радиальные последовательные (ИРПС) и радиальные параллельные (ИРПР).

Глава 4. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

4.1. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

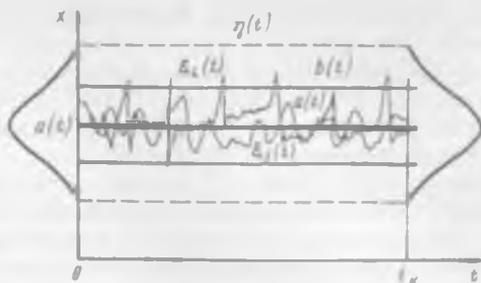
Объективной оценкой эффективности управления процессом служит качество изделий, которое характеризуется специально вводимыми показателями. Часть из этих показателей определяют потребительские свойства изделия, а часть — эффективность технологического процесса.

Одной из важных характеристик эффективности процесса, обеспечиваемой работой систем управления, является точность параметров изготавливаемого изделия. В этом случае качество характеризуют с помощью точностной диаграммы (рис. 4.1).

Пусть изделие характеризуется некоторым параметром качества $x(t)$, который должен сохраняться постоянным $x=a$ для данного типа изделия или стадии его изготовления. Примером $x(t)$ может быть толщина слоя диэлектрика или металла, толщина линии в топологии микросхемы, проводимость в локальной области подложки и т. п. Разброс параметра $x(t)$ характеризуют среднеквадратическим отклонением $\sigma(t)$ и полем рассеяния параметра $\eta(t)$. Обычно принимают, что хорошо отлаженный технологический процесс имеет нормальный закон распределения.

Для рис. 4.1 математическое ожидание $M\{x(t)\}=a(t)$, среднеквадратическое отклонение $\sigma\{x(t)\}=b(t)$, а $\eta(t)$ — представляет собой линию 3σ .

Рис. 4.1. Точностная диаграмма технологического процесса



Таким образом, точностная диаграмма представляет собой комбинацию показателей, которым должен удовлетворять случайный процесс изменения параметра качества во времени.

В нормативной документации, например ГОСТ 16 467 — 70 «Точность и стабильность технологических операций и методы расчета», для оценки качества технологического процесса используются термины: стабильность, устойчивость и воспроизводимость.

Стабильностью технологического процесса называют свойство процесса сохранять во времени параметры и закон распределения погрешностей параметров качества изделий. Пример, приведенный на рис. 4.1, соответствует стабильному технологическому процессу, поскольку плотность закона распределения при $t = t_0 = 0$ и $t = t_k$ одинаковы.

Устойчивостью технологического процесса называют свойство процесса сохранять во времени точность параметров качества изделий, т. е. $a(t)$ и $\sigma(t)$. Очевидно, что стабильные процессы всегда устойчивы. Обратное утверждение может быть и несправедливым.

Воспроизводимостью технологического процесса называют свойство процесса, характеризуемое близостью параметров качества изделий при повторениях процесса.

На практике для контроля технологического процесса и расчета показателей качества применяется метод контрольных карт, а распределение показателя оценивается в выбранные моменты времени t_i с помощью среднего значения случайной величины и среднеквадратического отклонения, или дисперсии.

Обеспечение качества изделий является основной целью МПСУ, включаемых в состав технологического оборудования, поэтому постановку задач управления необходимо сделать в терминах теории управления, которые отличаются от принятых в технологии. Для согласования терминологии используем понятия случайной функции, или стохастического процесса.

На рис. 4.1 приведены реализации $\xi_i(t)$ и $\xi_j(t)$ случайной функции.

Рассматривая ансамбль реализаций $\xi(t) \in x(t)$, можно установить, что устойчивость технологического процесса оценивается путем вычисления математического ожидания $M\{x(t)\}$ и среднеквадратического отклонения $\sigma\{x(t)\}$ случайного процесса. С помощью $M\{x(t)\}$ характеризуют настроенность, а $\sigma\{x(t)\}$ — точность технологического процесса.

Понятие стабильность должно трактоваться как требование получения стационарности случайного процесса. Воспроизводимость технологического процесса нужно рассматривать как требование соблюдения эргодической гипотезы. Признаком стационарности служит выполнение условий

$$M\{x(t)\} = \text{const}; \quad D\{x(t)\} = \sigma^2\{x(t)\} = \text{const}; \\ R_{xx}\{x(t), x(t_1)\} = R_{xx}(\tau), \text{ где } \tau = t_1 - t,$$

т. е. корреляционная функция зависит только от сдвига времени τ .

Корреляционная функция служит мерой связанности случайной величины в различные моменты времени. Она может быть применена для определения моментов контроля T_k .

Воспользуемся неравенством

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} \bar{x}(t) \bar{x}(t+\tau) dt \leq \varepsilon,$$

где $\bar{x}(t) = x(t) - a(t)$ — центрированное значение случайного процесса; ε — произвольное число.

Вычислим значение времени T , по истечении которого значение корреляционной функции становится меньше заданного, и назовем его моментом контроля $T = T_k$. Основанием такого выбора служит то, что малое значение корреляционной функции свидетельствует о независимости значений $x(t_2)$ от $x(t_1)$, т. е. информация о качестве технологического процесса в момент времени t_2 мало влияет на характеристики качества, получаемые в момент t_1 .

Случайная функция, отображающая качество технологического процесса, формируется как результат изменения многочисленных факторов, связанных со свойствами основных и вспомогательных материалов, особенностей работы самого оборудования, отдельных его подсистем, а также погрешностей технических средств контроля и управления. В этих условиях задача микропроцессорной системы должна рассматриваться как задача поддержания случайной функции или ее показателей в пределах, гарантирующих требуемое качество изделия. В тех случаях, когда значение параметра $x(t)$ на интервале $(0, T)$ времени выполнения технологической операции известно с вероятностью, равной единице, т. е. выполняется условие

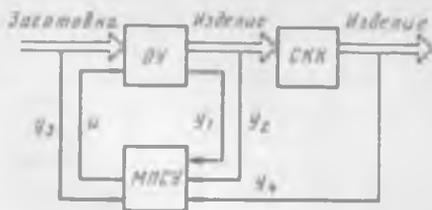


Рис. 4.2. Схема управления качеством изделия

$$P \left\{ \lim_{t \rightarrow T} |x(t) - a(t)| \leq \varepsilon \right\} = 1,$$

технологический процесс можно представлять детерминированной функцией. (Здесь ε — произвольное малое число, характеризующее допустимое отклонение $x(t)$ от номинала).

Таким образом, задача управления имеет своей целью обеспечение качества изделий путем направленного изменения режимов работы технологического оборудования и согласованного действия всех подсистем, входящих в его состав. Схема на рис. 4.2 иллюстрирует постановку задачи.

Технологическое оборудование состоит из объекта управления (ОУ) и микропроцессорной системы управления (МПСУ). В результате обработки из заготовки получают изделие. Параметры процесса обработки и некоторые свойства изделия и заготовки контролируются, и сигналы о них $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3, \bar{y}_4$ поступают в систему управления, которая вырабатывает управляющее воздействие \bar{u} . Векторы \bar{y}_1 и \bar{y}_2 в практике управления относят к операционному контролю, выполняемому во время технологической операции. Режим работы оборудования характеризуется вектором \bar{y}_1 , а измеряемые свойства изделия — \bar{y}_2 . Вектор \bar{y}_3 — результат входного контроля для рассматриваемой операции. Составляющие его образованы характеристиками предмета труда, основных и вспомогательных материалов. Вектор \bar{y}_4 — результат межоперационного контроля. Для получения его используются специальные технические средства, образующие в совокупности систему контроля качества (СКК).

Выделим задачи управления технологическим оборудованием и опишем особенности их выполнения. Для этого предположим, что требования к желаемому качеству параметров изделия преобразованы в требования к режимам работы оборудования. Эти требования представим вектором \bar{y}_* с компонентами y_{d1}, \dots, y_{dn} . Компоненты вектора y_{di} определяют допустимые по технологии изменения параметров, характеризующих режим работы оборудования, состояние его подсистем и т. п.

Правила получения \bar{y}_* как функции \bar{u} и \bar{y}_i составляют алгоритм функционирования системы. Составляющими алгоритма являются математические модели объекта управления и внешних воздействий, а также закон управления, реализованный в системе. Синтез

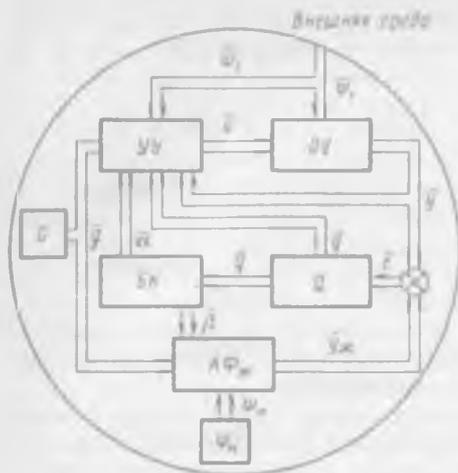


Рис. 4.3. Обобщенная модель системы управления

са $\Psi(t)$. Вектор $\Psi(t)$ представляет собой внешние воздействия на систему управления в процессе эксплуатации или испытаний. В общем случае $\Psi(t)$ является случайной функцией времени. При испытаниях значения компонентов Ψ_i , $i = \overline{1, n}$, устанавливаются предельными, регламентированными нормативными документами. Так, климатические условия определяются классом помещения, в котором будет эксплуатироваться оборудование, нормы качества электроэнергии — согласно ГОСТ 13.109-67. Наличие нормативных документов и опыт разработчиков позволяют сформировать модель внешних воздействий $\Psi_m(t)$, включая случайные, детерминированные и типовые.

Для постановки задач управления оборудованием введем понятие желаемого алгоритма функционирования (АФ_ж), под которым будем понимать правила получения $\hat{y}_x(T)$ путем выбора вектора $\hat{g}(t)$ такого, что при любых допустимых возмущениях $\xi(t) \in \Psi_m(t)$ критерий качества Q принимает экстремальное значение, а $y_d, y_x(T) \in y_x$. При этом полагаем, что T — время окончания технологического цикла, а $t \in [t_0, T]$.

Такая постановка приводит к задаче оптимального программного управления. Пусть связи управления (задающего воздействия) $g(t)$ и переменные состояния объекта описаны дифференциальным уравнением $\dot{x} = f(\bar{x}, \bar{g}, t)$. Тогда задача получения оптимальной программы сводится к определению вектор-функций $\hat{g}(t)$ и $\bar{x}(t)$, доставляющих экстремум функционалу $Q = Q(x, \bar{g})$ при ограничениях $x \in X_d$, $\bar{g} \in G$ и краевых условиях $x_0(t_0) \in X_{до}$.

закон (алгоритма) управления и его программная или аппаратная реализация составляют суть разработки МПСУ, а контроль правильности функционирования, методы отладки и аттестации — основное содержание работ, выполняемых при эксплуатации системы.

Для формализации задач и классификации алгоритмов управления воспользуемся обобщенной моделью СУ (рис. 4.3). Структурная схема модели разделяет элементы МПСУ и внешнюю среду, к которой относят требования к качеству изделия — вектор $y_x(t)$ и условия, характеризующие выполнение технологического процесса

$x(T) \in X_{dT}$. Здесь X_d — множество допустимых отклонений переменных состояния, характеризующих рабочие режимы оборудования; $X_{до}$ — множество начальных состояний, образованных показателями качества основных и вспомогательных материалов и исходных режимов работы оборудования; X_{dT} — множество характеристик изделия, измеряемых во время технологического процесса или при его завершении, и допустимые состояния подсистем оборудования в конце процесса.

Вид алгоритма AF_x зависит от решаемой задачи и может быть в простейшем случае алгебраической функцией, устанавливающей масштабное или функциональное соответствие между желаемым значением y_x и g_i . Например, при стабилизации температуры θ задание необходимого значения ее устанавливается с помощью изменения положения движка потенциометра, т. е. $\theta = f(R)$, где R — сопротивление в омах. В более сложных случаях AF_x представляет собой уравнение траектории изменения переменных $\bar{y}_x(t)$. Если при этом необходимо считать $y_x(t)$ случайной функцией, то критерий должен быть сформулирован в терминах теории вероятностей.

При управлении оборудованием пусковые и рабочие режимы часто обеспечиваются механизмами, имеющими конечное число состояний. В простейшем и наиболее распространенном случае число состояний равно двум: включено и отключено. Получение необходимой последовательности переключений также можно рассматривать как AF_x .

Программа работы МПСУ, содержащаяся в AF_x , представляет собой известную идеализацию, действительное поведение системы соответствует ей с некоторой погрешностью. Поэтому задачей управления является выполнение оптимальной программы при нарушениях, появляющихся либо из-за отклонений в переменных процессах, вызванных действием внешних возмущений, либо из-за допущений, принятых при построении модели системы, по которой рассчитывалась оптимальная программа.

Рассмотрим различные варианты взаимодействия объекта управления (ОУ), устройства управления (УУ), блока вычисления критерия качества Q и блока коррекции (БК) (рис. 4.3). Взаимодействие блоков осуществляется с помощью сигналов:

$\Psi(t)$ — вектора внешних воздействий, включающего в себя вектор $\Psi_1(t)$ составляющих, доступных измерениям;

$\bar{y}(t)$ — вектора управляющих воздействий, вырабатываемых устройством управления;

$y(t)$ — вектора результатов управления или целей, достигаемых при осуществлении технологического процесса;

$\bar{q}(t)$ — вектора оценок качества работы МПСУ;

Таблица 4.1. Классификация принципов управления

Вид управления	Описание	Сигналы (информация)				
		g	Ψ_1	y	q	y_*
Разомкнутый	$u = F(g)$	+	-	-	-	-
По возмущению	$u = F(g, \Psi_1)$	+	+	-	-	-
По отклонению	$u = F(g, y)$	+	-	+	-	-
Комбинированный	$u = F(g, y, \Psi_1)$	+	+	+	-	-
Экстремальный	$u = F(q, y)$	-	-	+	+	-
Оптимальный	$u = F(g, y, q, y_m)$	+	-	+	+	+
Непрямой адаптивный	$u = F(g, y, \bar{y}_*)$ $\alpha = F(q, y, \Psi)$	+	+	+	+	+
Прямой адаптивный	$u = F(g, y, y_*)$ $\alpha = F(q, y, \Psi)$ $\beta = F(q, y, \Psi_1)$	+	+	+	+	+

$\bar{\alpha}(t)$ — вектора изменения параметров устройства управления;

$\bar{\beta}(t)$ — вектора изменения параметров модели процесса.

Принцип построения устройства управления основан на минимизации некоторых функций разности между желаемой целью и полученным результатом: $\bar{y}_*(t) - y(t) = \bar{e}(t)$, где $\bar{e}(t)$ — ошибка системы, характеризующая абсолютную погрешность в момент времени t .

Погрешность $\bar{e}(t)$ может использоваться в составе алгоритма управления для замкнутых систем или для оценки качества управления в разомкнутых системах. Сигнал $\bar{q}(t)$ также может использоваться двояко: для оценки качества системы или для формирования управляющего воздействия.

В табл. 4.1 приведена классификация алгоритмов управления с использованием в качестве признаков введенные выше сигналы.

Анализ таблицы показывает, что часть систем (четыре первые типа) не используют в алгоритме информацию о желаемом значении вектора цели $y_*(t)$, а довольствуются его эквивалентом в виде задающего воздействия $\bar{g}(t)$. При этом оценка качества $\bar{q}(t)$ используется лишь для суждения о качестве работы и тем самым носит пассивный характер.

В алгоритме экстремальных систем управления, имеющих своей целью получения экстремума q цель отождествляется с экстремальным значением. В остальных алгоритмах одновременно решаются две задачи: получение оптимальной программы и обеспечение ее выполнения.

При выборе принципа управления следует руководствоваться функциями системы и возможностью получения достоверной информации, необходимой для принятия решения и выработки управляющего воздействия.

4.2. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В МПСУ можно выделить преобразования, выполняемые в дискретном времени при реализации алгоритмов в ЭВМ, и преобразования информации, связанные с процессами, происходящими в оборудовании при непрерывном представлении времени. При решении задач управления необходим единый математический аппарат, в качестве которого используются разностные уравнения.

На основании обобщенной модели (см. рис. 4.3) составим структурную схему системы управления (рис. 4.4).

Предположим, что все элементы, указанные на схеме, имеют линейные характеристики, а их описание выполнено с помощью передаточных функций. Отметим передаточные функции элементов, работающих в дискретном времени, и изображение сигналов, представляющих собой решетчатые функции, звездочками. Они характеризуют преобразования, выполняемые в ЭВМ. Передаточные функции на рис. 4.4 характеризуют свойства:

$W_0(s)$ — объекта управления;

$W_1(s)$, $W_2(s)$ — измерительных преобразователей y и Ψ ;

$W_3(s)$ — экстраполирующего устройства;

$W_{k1}^*(s)$, $W_{k2}^*(s)$ — алгоритмов преобразования задающего и возмущающего воздействий;

$W_4^*(s)$ — алгоритма управления;

$W_5^*(s)$ — желаемого алгоритма функционирования;

Q — алгоритма вычисления критерия качества.

Сигналы, используемые в схеме:

\hat{y} и $\hat{\Psi}$ — измеренные значения выходной переменной и возмущения;

\hat{y}^* и $\hat{\Psi}^*$ — их дискретное представление;

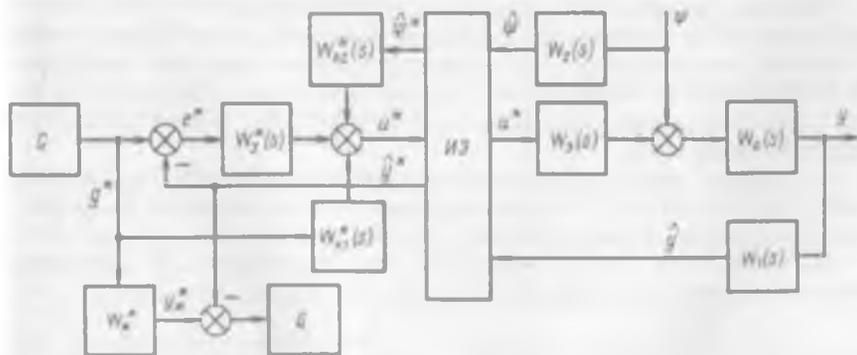


Рис. 4.4. Схема системы управления

u^* — управляющее воздействие;

e^* — ошибка рассогласования замкнутой системы;

y_0^* — желаемое значение выходной переменной.

Пользуясь дискретным преобразованием Лапласа и полагая, что все переменные в описании берутся в дискретные моменты времени, определяемые частотой квантования импульсного элемента (ИЭ), запишем:

$$Y^*(s) = \frac{[W_1(s) W_0(s)]^* [W_3(s) + W_2(s)]}{1 + W_3(s) [W_1(s) W_0(s)]^*} G^*(s) + \frac{[W_0(s) \Psi(s)]^* - W_2(s) [W_2(s) \Psi(s)]^*}{1 + W_3(s) [W_1(s) W_0(s)]^*} \Psi^*(s).$$

Для воспроизведения без погрешности задающего воздействия $g(t)$ и полного подавления возмущения $\Psi(t)$ необходимо выполнить условия абсолютной инвариантности:

$$[W_1(s) W_0(s)]^* [W_3(s) + W_{k1}^*(s)] = 1;$$

$$[W_0(s) \Psi(s)]^* - W_{k2}^*(s) [W_2(s) \Psi(s)]^* = 0.$$

Поскольку в системе предусмотрены два канала распространения воздействия, то условия абсолютной инвариантности могут быть физически реализованы. При известных характеристиках объекта управления, измерительных преобразователей и алгоритма управления $W_3(s)$ можно определить функции $W_{k1}^*(s)$ и $W_{k2}^*(s)$:

$$W_{k1}^*(s) = \frac{1 - W_3(s) [W_1(s) W_0(s)]^*}{[W_1(s) W_0(s)]^*};$$

$$W_{k2}^*(s) = \frac{[W_0(s) \Psi(s)]^*}{[W_2(s) \Psi(s)]^*}.$$

Условие физической реализуемости функций $W_{k1}^*(s)$ и $W_{k2}^*(s)$ требует, чтобы степень полинома числителя была не выше степени полинома знаменателя. Последнее условие в широком диапазоне частот обычно не выполнимо. Однако полученные значения могут быть использованы для оценки желаемого вида преобразования в рабочем диапазоне.

В практике управления параметрами технологического оборудования часто применяют только принцип обратной связи, а элементы с передаточными функциями $W_{k1}^*(s)$, $W_{k2}^*(s)$ не используются.

Полагая для схемы рис. 4.4 $W_{k1}^*(s) = W_{k2}^*(s) = 0$, вычислим дискретное преобразование Лапласа выходной переменной $y^*(t)$:

$$\hat{y}^*(s) = \frac{W_3(s) [W_1(s) W_0(s) W_1(s)]^*}{1 + W_3(s) [W_1(s) W_0(s) W_1(s)]^*} G^*(s) + \frac{[W_0(s) W_1(s) \Psi(s)]^*}{1 + W_3(s) [W_1(s) W_0(s) W_1(s)]^*}$$

Определим абсолютную погрешность системы:

$$\Delta = y^*(s) - \bar{y}^*(s) = W_x^*(s) G^*(s) - y^*(s) =$$

$$= \frac{W_x^*(s) + [W_x^*(s) - 1] W_3^*(s) [W_1(s) W_0(s) W_1(s)]^*}{1 + W_3^*(s) [W_1(s) W_0(s) W_1(s)]^*} G^*(s) -$$

$$\frac{[W_0(s) W_1(s) \Psi(s)]^*}{1 + W_3^*(s) [W_1(s) W_0(s) W_1(s)]^*}.$$

Полученное значение Δ представляет собой полную характеристику погрешности и позволяет рассчитывать показатели качества переходного процесса. Для получения прямой оценки качества, определяемой с помощью показателей: времени регулирования, перерегулирования и установившейся погрешности, необходимо перейти к временным характеристикам погрешности. Расчет временных характеристик зависит от вида экстраполятора, частоты квантования и требований, предъявляемых к точности системы.

Выбор периода квантования. Для преобразования непрерывного сигнала в дискретный МПСУ используют АЦП, в которых выполняется цифровое квантование, включающее в себя как квантование по уровню, так и по времени. Для преобразования цифрового сигнала в непрерывный используются ЦАП и экстраполяторы.

Если погрешности преобразователей выбраны достаточно малыми, то качество управления существенно зависит от периода квантования. При выборе периода квантования пользуются моделью, структура которой приведена на рис. 4.5, а.

Импульсный элемент (ИЭ) преобразует непрерывный сигнал $u(t)$ в $u^*(t)$, который можно представить в виде бесконечного ряда

$$u^*(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u(t) \delta(t - nT_0),$$

где T_0 — период квантования; $\delta(t - nT_0)$ — дельта-функция.

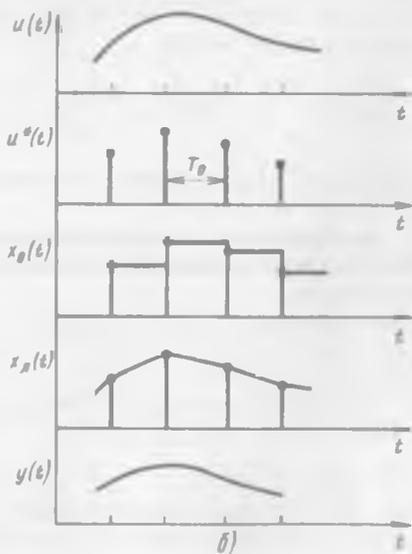
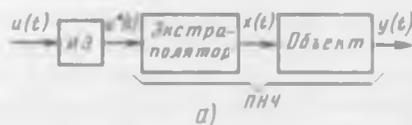


Рис. 4.5. Представление непрерывного сигнала при дискретизации

Последовательное соединение экстраполятора и объекта образует приведенную непрерывную часть (ПНЧ) системы. Задача экстраполятора заключается в преобразовании сигнала между двумя последовательными моментами квантования. Эта задача решается в МПСУ аппаратными средствами.

Применение экстраполяторов призвано решить задачу восстановления непрерывного сигнала по виду решетчатой функции $u^*(t)$. В литературе принято называть преобразователи, приводящие к сигналу $x_0(t)$, экстраполяторами нулевого порядка, или фиксаторами, а к $x_1(t)$ — экстраполяторами первого порядка (рис. 4.5, б). Сигнал на выходе приведенной непрерывной части можно записать, используя импульсную переходную функцию $k_u(t-\tau)$, следующим образом:

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^x k_u(t-\tau) u^*(\tau) d\tau = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^x k_u(t-\tau) u(\tau) \delta(\tau - nT_0) d\tau.$$

Выбор периода квантования T_0 преследует цель обеспечить восстановление непрерывного сигнала с заданной погрешностью, беря для этого наименьшее число изменений, т. е. увеличивая период квантования. Общие рекомендации по выбору T_0 основаны на теореме В. А. Котельникова, согласно которой для воспроизведения сигнала максимальный период квантования T_{0k} не должен превышать $T_{0k} \leq 1/(2f_m)$, где T_{0k} — период квантования, выбранный на основе теоремы Котельникова; f_m — максимальная частота в спектре сигнала. В этом случае непрерывный сигнал будет представлен рядом

$$u_k(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u(nT_0) \frac{\sin[\omega_m(t - T_{0k})]}{\omega_m(t - T_{0k})}, \quad (4.1)$$

где $\omega_m = 2\pi f_m$, а дробь, входящая в выражение, носит название функции отсчетов.

Погрешность, получаемая при таком выборе в предположении, что f_m неограниченна или достаточно велика, оценивается неравенством

$$\sqrt{\frac{E_m}{E}} \leq \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} [u(t) - u_k(t)]^2 dt}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} u^2(t) dt}} \leq 1,73 \sqrt{\frac{E_m}{E}},$$

где E — полная энергия спектра сигнала; E_m — энергия высокочастотной части спектра, т. е. заключенная в полосе частот выше f_m .

Максимально допустимая величина периода квантования при различных экстраполяторах может быть определена следующим образом.

Пусть непрерывный сигнал $u(t)$ заменен рядом (4.1) с конечным числом членов k . Тогда абсолютная погрешность аппроксимации

$$\varepsilon = \left| u(t) - \sum_{n=-k}^k u(nT_0) \frac{\sin \omega_0(t-nT_0)}{\omega_0(t-nT_0)} \right| = |u(t) - u_k(t)|.$$

Поскольку $T_0 = \text{const}$, то погрешность можно оценить, пользуясь интерполяционной формулой Ньютона:

$$u_k = u_0 + \frac{\Delta u}{T_0}(t-t_0) + \frac{\Delta^2 u}{2! T_0^2}(t-t_0)(t-t_1) + \dots + \\ + \frac{\Delta^k u}{k! T_0^k}(t-t_0) \dots (t-t_{k-1}) + R(t),$$

где $\Delta^n u$ — конечные разности n порядка; u_0 — значение u при $t=t_0$; $R(t)$ — остаточный член ряда, который служит оценкой погрешности аппроксимации.

Обозначив разность $t_{n+1} - t_n = T_0 = \text{const}$, $n=0, k$ и заменив конечные разности производными, запишем

$$R(t) = \frac{u^{k+1}}{(k+1)! T_0^{k+1}} (t-t_0) \dots (t-t_k). \quad (4.2)$$

Определим погрешность на интервалах времени между точками квантования, т. е. при $t \neq nT_0$. Обозначим $(t-t_n)/T_0 = v$ и подставим в (4.2). После преобразований получим

$$R(t) = \frac{u^{k+1}}{(k+1)!} T_0^{k+1} \prod_{n=0}^k v-n.$$

Заладимся условием

$$R(t) = \max |u(t) - u_k(t)| \leq \varepsilon_{\text{доп}}. \quad (4.3)$$

которое устанавливает требование: максимальное значение абсолютной погрешности на интервалах между точками квантования не должно превышать заданное.

Для усиления неравенства (4.3) подставим в него максимальные значения модуля переменных, т. е.

$$R(t) = \frac{\max |u^{k+1}|}{(k+1)!} T_0^{k+1} \max \left| \prod_{n=0}^k v-n \right| < \varepsilon_{\text{доп}}.$$

Последняя формула является общей. Из нее, задавая значение k , которое соответствует степени аппроксимирующего полинома, описывающего выполняемое экстраполятором преобразование, можно получить величину T_0 .

Пример 1. Определить T_0 для системы, в которой используется экстраполятор нулевого порядка (см. рис. 4.5, б, $x_0(t)$).

Так как в этом случае $k=0$, то $\max |x'| T_0 < \varepsilon_{\text{доп}}$, откуда $T_0 = \varepsilon_{\text{доп}} / \max |x'|$.

Пример 2. Определить T_0 для системы с экстраполятором первого порядка линейным (см. рис. 4.5, б, $x_n(t)$).

Так как в этом случае $k=1$, то $\frac{\max(x'')}{2} T_0 \max |v(v-1)| < \epsilon_{\text{доп}}$, откуда $T_0 = \sqrt{8\epsilon_{\text{доп}} / \max |x''|}$.

Оценим выигрыш от увеличения периода квантования в зависимости от степени воспроизводящего полинома с помощью коэффициента

$$\rho_k = T_{0k} / T_0,$$

где T_{0k} — период квантования при экстраполяторе k порядка; T_0 — период квантования при $k=0$. Сопоставим эффективность использования сложных экстраполяторов (табл. 4.2) при различных требованиях к относительной погрешности γ системы.

Анализ таблицы показывает, что повышение степени воспроизводящего полинома существенно изменяет период квантования только для прецизионных систем. При удовлетворительной погрешности 5% переход от линейного экстраполятора к квадратичному увеличивает период лишь на 45%, что вряд ли окупится из-за возрастающих аппаратных затрат. В это же время переход от экстраполятора нулевого уровня к линейному изменит период квантования на порядок.

Типичные алгоритмы управления. Наибольшее распространение в системах управления технологическими параметрами оборудования микроэлектроники нашли линейные законы управления.

В непрерывных системах обычно используются П-, ПИ-, ПИД-законы. Уравнение ПИД-регулятора можно записать так:

$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_n} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}.$$

Полагая в нем $T_d=0$, получаем ПИ-регулятор, а принимая $T_n=0$ и $1/T_n=0$ — П-регулятор.

Если влияние квантования мало, т. е. частота его велика по сравнению с полосой частот непрерывной части системы, выбор

Таблица 4.2. Эффективность экстраполяторов высокого порядка

ρ_k	γ						
	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005	0.001
ρ_1	6.35	8.95	1.27	20	28.3	40	89.5
ρ_2	7.32	11.6	18.4	34	53.9	85.2	250
ρ_3	6.54	12.5	20	36.7	67	118	395

настраиваемых параметров T_n , T_d и K , выполненный для непрерывной модели, может быть распространен на дискретный регулятор.

Дискретный ПИД-регулятор можно реализовать в микроЭВМ разными способами. Эти различия связаны с применяемым вычислительным алгоритмом (рекуррентный или нерекуррентный) и принятым методом вычисления интеграла (метод прямоугольников или трапеций). Различные варианты алгоритмов сведены в табл. 4.3. Рекуррентные алгоритмы основаны на вычислении приращений, поэтому они характеризуются высоким быстродействием и требуют меньшего объема памяти. Этим и вызвано их более широкое распространение. Замена приращения ошибки системы на выходную переменную обеспечивает уменьшение бросков управляющего воздействия при скачкообразном изменении задания.

Высокое быстродействие ЭВМ дает возможность употреблять при выработке управляющего сигнала несколько замеров выходной переменной. Это используется для усреднения сигналов, что повышает помехоустойчивость системы. Примером таких алгоритмов служит последний алгоритм, приведенный в табл. 4.3.

При существенной частоте квантования выбор параметров настройки регуляторов можно выполнить следующим образом. Запишем алгоритм ПИД-закона в виде дискретной передаточной функции

$$W_3(z) = \frac{g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (4.4)$$

Наличие полюса $z=1$ обеспечивает получение нулевой установившейся ошибки при ступенчатом изменении входного воздействия. Диапазон изменения параметров регулятора должен удовлетворять условиям:

$$g_0 > 0; \quad g_1 < -g_0; \quad -(g_0 + g_1) < g_2 < g_0. \quad (4.5)$$

Коэффициенты в ПИД-заоне связаны с параметрами g следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{коэффициент передачи } K &= g_0 - g_2; \\ \text{коэффициент дифференцирования } c_d &= g_2 / K; \\ \text{коэффициент интегрирования } c_n &= (g_0 + g_1 + g_2) / K. \end{aligned}$$

Теперь $W_3(z)$ можно представить в виде

$$W_3(z) = \frac{K[(1 + c_d) + (c_n - 2c_d - 1)z^{-1} + c_d z^{-2}]}{(1 - z^{-1})}.$$

Полученный алгоритм управления аналогичен непрерывному ПИД-закону, если выполнены условия (4.5) и $c_d > 0$; $c_n > 0$; $c_n < c_d$. Положив в (4.4) $g_2 = 0$, получим

$$\bar{W}_3(z) = \frac{g_0 + g_1 z^{-1}}{(1 - z^{-1})} = \frac{K[1 + (c_n - 1)z^{-1}]}{1 - z^{-1}},$$

Таблица 4.3 Вычислительные алгоритмы ПИД-законов

Алгоритмы дискретных ПИД-законов	Особенности реализации
$u(k) = K \left[e(k) + \frac{T_0}{T_n} \sum_{i=0}^k e(i-1) + \frac{T_d}{T_0} [e(k) - e(k-1)] \right]$	Нереккуррентный, интегрирование методом прямоугольников
$u(k) = u(k-1) + g_0 e(k) + g_1 e(k-1) + g_2 e(k-2);$ $g_0 = K \left(1 + \frac{T_n}{T_0} \right); \quad g_1 = -K \left(1 + 2 \frac{T_n}{T_0} - \frac{T_d}{T_n} \right); \quad g_2 = K \frac{T_d}{T_0}$	Рекуррентный, интегрирование методом прямоугольников
$u(k) = u(k-1) + g_0 e(k) + g_1 e(k-1) + g_2 e(k-2);$ $g_0 = K \left(1 + \frac{T_0}{2T_n} + \frac{T_d}{T_0} \right); \quad g_1 = -K \left(1 + 2 \frac{T_n}{T_0} \cdot \frac{T_d}{2T_n} \right);$ $g_2 = K \frac{T_d}{T_0}$	Рекуррентный, интегрирование методом трапеций
$u(k) = u(k-1) + K \left[e(k) + e(k-1) + \frac{T_0}{T_n} e(k-1) \right] +$ $+ \frac{T_d}{T_0} [-y(k) + 2y(k-1) - y(k-2)];$ $u(k) = u(k-1) + K [-y(k) + y(k+1) + \frac{T_0}{T_n} e(k-1) +$ $+ \frac{T_d}{T_0} [-y(k) + 2y(k-1) - y(k-2)]]$	Рекуррентный, с заменой производной ошибки на производную выходной переменной
$u(k) = p_1 u(k-1) + p_2 u(k-2) + g_0 e(k) +$ $+ g_1 e(k-1) + g_2 e(k-2);$ $p_1 = \frac{-4c_1}{1+2c_1}; \quad p_2 = \frac{2c_1-1}{1+2c_1};$ $g_0 = K \frac{[1+2(c_1+c_n)+c_n(1+2c_1)/2]}{1+2c_1};$ $g_1 = K \left[\frac{c_1-4(c_1+c_n)}{1+2c_1} \right];$ $g_2 = K \left[\frac{c_1(2-c_1)+2c_n+0,5c_1-1}{1+2c_1} \right];$ $c_1 = T_1/T_0; \quad c_n = T_0/T_n; \quad c_n = T_n/T_0$	Рекуррентный с улучшенным сглаживанием производной

т. е. ПИ-регулятор. Если при этом положить $g_0=0$, то

$$W_3(z) = \frac{g_1 z^{-1}}{1-z^{-1}}$$

Последнее служит алгоритмом И-закона регулирования.

Аналогично можно реализовать П- и ПД-алгоритмы управления.

4.3. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА

Управление последовательностью технологического цикла или состоянием технологического оборудования подразумевает формирование в фиксированные моменты времени дискретных управляющих сигналов типа «Включить», «Выключить», «Подать на позицию», «Открыть затвор» и т. п.

Исходные требования к разрабатываемому управляющему цифровому устройству формулируют обычно в виде словесного описания. Определение структуры устройства, удовлетворяющей этому описанию, подразделяют на две части—абстрактный и структурный синтезы.

В ходе абстрактного синтеза осуществляется переход от словесного описания устройства к формализованному заданию его оператора в виде графов, таблиц, матриц. Сущность задания оператора независимо от его формы состоит в определении перечня входных и выходных переменных устройства и установлении связей между ними.

В процессе структурного синтеза определяется структурная схема устройства. Научной основой этого этапа является аппарат алгебры логики (булевой алгебры), который позволяет перейти к заданию оператора в виде формул и затем упростить последние в соответствии с требованиями к структуре устройства.

В инженерной практике по проектированию управляющих логических устройств промышленной автоматики под логическим синтезом следует понимать процесс составления структурных формул, описывающих схему устройства, по заданным условиям технологического процесса.

Логические функции. Любое логическое выражение, составленное из n двоичных переменных с помощью конечного числа операций алгебры логики, можно рассматривать как некоторую логическую (булеву) функцию n переменных:

$$F = F(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где F может принимать только два значения: 0 или 1.

Таблица 4.4. Логические функции двух переменных

i	A _i		Функции двух переменных															
	x ₁	x ₂	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄	F ₁₅
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
2	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
3	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

Рассмотрим логические функции двух переменных (табл. 4.4). Произвольный набор значений переменных x_1, x_2 можно рассматривать как двоичное число a_1a_2 , младший разряд которого равен a_2 . Например, набору значений переменных $x_1=1, x_2=0$ соответствует двоичное число 10. Наборы значений переменных удобно нумеровать десятичными числами i , двоичные эквиваленты которых обозначаются A_i . Таким образом, наборы значений 00, 01, 10, 11 переменных x_1, x_2 обозначаются A_0, A_1, A_2, A_3 соответственно.

Значения каждой отдельно взятой функции двух переменных можно рассматривать как четырехразрядное двоичное число. Тогда значения всех логических функций двух переменных (см. столбцы табл. 4.4) представляют собой двоичные числа 0000, 0001, 0010, ..., 1111. Десятичными эквивалентами этих чисел и пронумерованы все функции в табл. 4.4.

Функции F_0 и F_{15} — вырожденные логические функции, представляющие собой константы 0 и 1 соответственно. Функции F_3, F_5, F_{10}, F_{12} зависят только от одной переменной и определяются следующими выражениями:

$$F_3 = F_3(x_1, x_2) = x_1, \quad F_5 = F_5(x_1, x_2) = x_2, \\ F_{12} = F_{12}(x_1, x_2) = \bar{x}_1, \quad F_{10} = F_{10}(x_1, x_2) = \bar{x}_2.$$

Функции F_1 и F_7 называются конъюнкцией и дизъюнкцией соответственно.

Широко используются и имеют специальные названия логические функции F_6, F_8, F_9, F_{14} :

$F_6 = x_1 \oplus x_2$ — сложение по модулю два (исключительное ИЛИ, неравнозначность);

$$F_9 = x_1 \oplus x_2 \text{ — равнозначность;}$$

$$F_8 = x_1 \vee x_2 \text{ — ИЛИ-НЕ } (F_8 = x_1 \downarrow x_2 \text{ — стрелка Пирса);}$$

$$F_{14} = x_1 \cdot x_2 \text{ — И-НЕ } (F_{14} = x_1 / x_2 \text{ — штрих Шеффера).}$$

Примечание: обозначения и названия логических функций F_8 и F_{14} , данные в скобках, используются очень ограниченно.

Введем некоторые определения.

Таблица 4.5. Минтермы и макстермы

Аргумент		Минтермы				Макстермы			
x ₁	x ₂	C ₀ ¹	C ₁ ¹	C ₂ ¹	C ₃ ¹	C ₀ ⁰	C ₁ ⁰	C ₂ ⁰	C ₃ ⁰
0	0	1	0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	0	0	1	0	1	1
1	0	0	0	1	0	1	1	0	1
1	1	0	0	0	1	1	1	1	0

Минтермом называют логическую функцию, которая принимает единичное значение только на одном из всех возможных наборов аргументов. Макстермом называют логическую функцию, которая принимает нулевое значение только на одном из всех возможных наборов аргументов. Минтермы C_i^1 и макстермы C_i^0 , зависящие от двух аргументов, представлены в табл. 4.5.

Количество минтермов и макстермов заданного числа аргументов n , как следует из определения, совпадает с числом различных наборов аргументов 2^n .

Алгебраически минтерм представляется в виде конъюнкции прямых и инверсных значений аргументов, причем в прямой форме входят аргументы, имеющие в рассматриваемом наборе единичное значение. Макстерм представляется в виде дизъюнкции прямых и инверсных значений аргументов, причем в прямой форме входят аргументы, имеющие в рассматриваемом наборе нулевое значение. Например:

<i>минтермы</i>	<i>макстермы</i>
$C_0^1 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2,$	$C_0^0 = (x_1 \vee x_2),$
$C_1^1 = \bar{x}_1 \cdot x_2,$	$C_1^0 = (x_1 \vee \bar{x}_2),$
$C_2^1 = x_1 \cdot \bar{x}_2,$	$C_2^0 = (\bar{x}_1 \vee x_2),$
$C_3^1 = x_1 \cdot x_2,$	$C_3^0 = (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2).$

Известно, что любую логическую функцию можно представить в совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ):

$$F(x_1, \dots, x_n) = \bigvee_{i=0}^{N=2^n-1} \alpha_i^1 C_i^1, \quad (4.6)$$

где α_i^1 — единичное значение функции в наборе с номером i ; C_i^1 — минтерм, соответствующий набору с номером i .

Аналогично любую логическую функцию можно представить в совершенной конъюнктивной нормальной форме (СКНФ):

$$F(x_1, \dots, x_n) = \bigwedge_{i=0}^{N=2^n-1} (\alpha_i^0 \vee C_i^0), \quad (4.7)$$

где α_i^0 — нулевое значение функции в наборе с номером i ;
 C_i^0 — макстерм, соответствующий набору с номером i .

Рассмотрим СДНФ и СКНФ некоторых логических функций двух переменных (см. табл. 4.4):

СДНФ:

$$F_1 = x_1 \cdot x_2; \quad F_6 = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2; \quad F_7 = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_2;$$

$$F_8 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2; \quad F_{14} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_2;$$

СКНФ:

$$F_1 = (x_1 \vee x_2) \cdot (x_1 \vee \bar{x}_2) \cdot (\bar{x}_1 \vee x_2); \quad F_6 = (x_1 \vee x_2) \cdot (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2);$$

$$F_7 = x_1 \vee x_2; \quad F_8 = (x_1 \vee \bar{x}_2) \cdot (\bar{x}_1 \vee x_2) \cdot (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2); \quad F_{14} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2.$$

Анализируя выражения СДНФ и СКНФ, заметим, что для реализации любой сколь угодно сложной логической функции $F(X_1, \dots, X_n)$ достаточно использовать систему, состоящую из трех функций: И, ИЛИ, НЕ. Системы функций, обладающие таким свойством, называют функционально полными, или базами. Можно показать, что каждая из функций И-НЕ, ИЛИ-НЕ, а также И-ИЛИ-НЕ является базисом.

Таким образом, любую сколь угодно сложную логическую функцию можно реализовать, например, только на одних элементах И-НЕ.

Методика составления структурных формул. Для выполнения логического синтеза управляющих логических устройств промышленной автоматики необходимо располагать исчерпывающей информацией о технологическом процессе для записи условий работы системы управления технологическим оборудованием. Предварительно изучается технологический процесс и совместно с технологами рассматриваются каждая операция процесса и применяемое оборудование, уточняются последовательность операций и необходимые временные задержки для всех режимов работы объектов управления, определяются параметры и показатели, подлежащие контролю и учету в ходе процесса, исследуются информационные связи с местными и центральными постами управления.

При определении технологических условий работы проектируемой системы управления необходимо руководствоваться действующими правилами и нормами, а также ведомственными указаниями по проектированию технологического оборудования и систем автоматического управления. Кроме того, необходимо изучить инструкцию по техническому обслуживанию аналогичного действующего технологического оборудования. Это позволит выявить специфические условия, предъявляемые к системе управления этим оборудованием.

Первый этап. Производится разделение всех действующих в системе управления сигналов на входные, выходные и промежу-

точные. Каждому сигналу присваивается буквенное обозначение. Выявляются и обозначаются все входные сигналы, к которым относятся сигналы, поступающие от кнопок управления, концевых и промежуточных выключателей, датчиков и т. п. Производится сокращение числа входных сигналов путем объединения, например конъюнкция объединяемых сигналов заменяется одним эквивалентным сигналом. Выявляются и группируются все выходные сигналы, управляющие исполнительными устройствами: контакторами, электромагнитными реле, транзисторными и тиристорными ключами и т. д.

Второй этап. На этом этапе составления структурных формул производится запись алгебраических выражений, соответствующих выходным и промежуточным переменным структурной схемы. Указанные алгебраические выражения представляются, как правило, в совершенной дизъюнктивной (4.6) или конъюнктивной (4.7) нормальной форме.

Пример. Составить структурные формулы, определяющие алгоритмы функционирования логического устройства, управляющего процессом загрузки — выгрузки лодочки с подложками в реактор.

Процесс загрузки — выгрузки представляет собой набор последовательных операций перемещения следующих механизмов: затвора, заслонки, механизма перемещения платформы, механизма перемещения лодочки (штанги МПЛ), механизма подъема (штока МП).

Входные дискретные сигналы логического устройства

От датчиков положения затвора:	D_1	D_2
затвор открыт	1	0
затвор закрыт	0	1
От датчиков положения заслонки:	D_3	D_4
заслонка открыта	1	0
заслонка закрыта	0	1
От датчиков положения платформы:	D_5	D_6
платформа в крайнем положении от реактора	1	0
платформа в крайнем положении к реактору	0	1
От датчиков положения штанги МПЛ:	D_7	D_8
штанга в крайнем положении от реактора	1	0
штанга в крайнем положении к реактору	0	1
От датчиков положения штока МП:	D_9	D_{10}
шток — вверх	1	0
шток — вниз	0	1
Выгрузки:	$Bг$	—
режим выгрузки подложек из реактора	1	—
выгрузки нет	0	—
Загрузки:	$Зг$	—
режим загрузки подложек в реактор	1	—
загрузки нет	0	—

Сигнал останова
Режим останова загрузки — выгрузки
Остановка нет

Ост
1
0

Выходные дискретные сигналы логического устройства:

- K_1 открывает затвор;
- K_2 закрывает затвор;
- K_3 открывает заслонку;
- K_4 закрывает заслонку;
- K_5 перемещает платформу от реактора;
- K_6 перемещает платформу к реактору;
- K_7 перемещает штангу МПЛ от реактора;
- K_8 перемещает штангу МПЛ к реактору;
- K_9 перемещает шток МП вверх;
- K_{10} перемещает шток МП вниз.

Словесное описание алгоритма управления состояниями процесса загрузки — выгрузки:

1. Исходное состояние. Затвор и заслонка закрыты, платформа и штанга МПЛ находятся в крайнем положении от реактора, шток МП — вверху.
2. Выгрузка ($Bг = 1$).
 - 2.1. Открыть затвор.
 - 2.2. Открыть заслонку.
 - 2.3. Переместить платформу в крайнее положение к реактору.
 - 2.4. Переместить штангу МПЛ в крайнее положение к реактору.
 - 2.5. Переместить шток МП вниз, т. е. осуществить сцепление штанги с лодочкой, в которой находятся подложки.
 - 2.6. Переместить штангу МПЛ в крайнее положение от реактора (при этом лодочка с подложками окажется на платформе).
 - 2.7. Переместить платформу в крайнее положение от реактора.
 - 2.8. Закрывать заслонку.
 - 2.9. Закрывать затвор.
3. Загрузка ($ЗГ = 1$).
 - 3.1. Открыть затвор.
 - 3.2. Открыть заслонку.
 - 3.3. Переместить платформу в крайнее положение к реактору.
 - 3.4. Переместить штангу МПЛ в крайнее положение к реактору (при этом лодочка с подложками окажется в реакторе).
 - 3.5. Переместить шток МП вверх, т. е. осуществить разъединение штанги с лодочкой.
 - 3.6. Переместить штангу МПЛ в крайнее положение от реактора.
 - 3.7. Переместить платформу в крайнее положение от реактора.
 - 3.8. Закрывать заслонку.
 - 3.9. Закрывать затвор.

Примечание: после выполнения операции загрузки устройство загрузки — выгрузки снова окажется в исходном состоянии.

Используя словесное описание алгоритма управления и введенные обозначения дискретных сигналов, составим таблицу истинности логического устройства (табл. 4.6).

Таблица 4.6. Таблица истинности логического устройства

Алгоритм	Входные сигналы												Выходные сигналы											
	Ост	Вг	Зг	Д ₁	Д ₂	Д ₃	Д ₄	Д ₅	Д ₆	Д ₇	Д ₈	Д ₉	Д ₁₀	К ₁	К ₂	К ₃	К ₄	К ₅	К ₆	К ₇	К ₈	К ₉	К ₁₀	
1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.2	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.3	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2.4	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2.5	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2.6	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2.7	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2.8	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2.9	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.2	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3.3	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3.4	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3.5	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
3.6	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3.7	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3.8	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3.9	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

На основе полученной таблицы истинности и формулы (4.6) напомним алгебраические выражения для управляющих сигналов $K_1 \dots K_{10}$:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \overline{\text{Ост}} \text{Вг} \text{Зг} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 \text{Д}_9 \text{Д}_{10} \vee \\
 &\vee \overline{\text{Ост}} \text{Вг} \text{Зг} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 \text{Д}_9 \text{Д}_{10} = \\
 &= \overline{\text{Ост}} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 (\text{Вг} \text{Д}_9 \vee \text{Зг} \text{Д}_{10}); \\
 K_2 &= \overline{\text{Ост}} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 (\text{Вг} \text{Д}_{10} \vee \text{Зг} \text{Д}_9); \\
 K_3 &= \overline{\text{Ост}} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 (\text{Вг} \text{Д}_9 \vee \text{Зг} \text{Д}_{10}); \\
 K_4 &= \overline{\text{Ост}} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 (\text{Вг} \text{Д}_{10} \vee \text{Зг} \text{Д}_9); \\
 K_5 &= \overline{\text{Ост}} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 (\text{Вг} \text{Д}_{10} \vee \text{Зг} \text{Д}_9); \\
 K_6 &= \overline{\text{Ост}} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 (\text{Вг} \text{Д}_9 \vee \text{Зг} \text{Д}_{10}); \\
 K_7 &= \overline{\text{Ост}} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 (\text{Вг} \text{Д}_{10} \vee \text{Зг} \text{Д}_9); \\
 K_8 &= \overline{\text{Ост}} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 (\text{Вг} \text{Д}_9 \vee \text{Зг} \text{Д}_{10}); \\
 K_9 &= \overline{\text{Ост}} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 \text{Зг} \text{Д}_{10}; \\
 K_{10} &= \overline{\text{Ост}} \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 \text{Вг} \text{Д}_9.
 \end{aligned}$$

Обозначим

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 \overline{\text{Ост}}; \\
 X_2 &= \text{Д}_1 \text{Д}_2 \text{Д}_3 \text{Д}_4 \text{Д}_5 \text{Д}_6 \text{Д}_7 \text{Д}_8 \overline{\text{Ост}};
 \end{aligned}$$

$$X_3 = D_1 D_2 D_3 D_4 D_5 D_6 D_7 D_8 \overline{\text{Ост}};$$

$$X_4 = D_1 D_2 D_3 D_4 D_5 D_6 D_7 D_8 \overline{\text{Ост}};$$

$$X_5 = D_1 D_2 D_3 D_4 D_5 D_6 D_7 D_8 \overline{\text{Ост}};$$

$$X_6 = \text{Вг } D_9; \quad X_7 = \text{Вг } D_{10};$$

$$X_8 = \text{Зг } D_{10}; \quad X_9 = \text{Зг } D_{10}.$$

С учетом данных обозначений алгебраические выражения для управляющих сигналов приобретают следующий вид:

$$K_1 = X_1 X_6 \vee X_1 X_9; \quad K_2 = X_2 X_7 \vee X_2 X_8; \quad K_3 = X_2 X_6 \vee X_2 X_9;$$

$$K_4 = X_3 X_7 \vee X_3 X_8; \quad K_5 = X_4 X_7 \vee X_4 X_8; \quad K_6 = X_3 X_6 \vee X_3 X_9;$$

$$K_7 = X_5 X_7 \vee X_5 X_8; \quad K_8 = X_4 X_6 \vee X_4 X_9; \quad K_9 = X_5 X_9; \quad K_{10} = X_5 X_6.$$

При аппаратной реализации полученные алгебраические выражения (структурные формулы) вначале представляются в определенном базисе, например И-НЕ, а затем реализуются на интегральных микросхемах определенной серии, например К155. При использовании программируемых логических контроллеров указанные формулы реализуются на основе программируемых логических матриц.

4.4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Линейризация градуировочных характеристик (ГХ) измерительных преобразователей. Большинство первичных измерительных преобразователей имеют нелинейную ГХ. Поэтому для получения значения измеряемого параметра по входному напряжению измерительного преобразователя необходимо выполнить некоторое нелинейное преобразование. Эту операцию называют линейризацией. Место и способ реализации ее могут быть разными для разных видов МПСУ. В МПСУ централизованного управления она обычно выполняется ЭВМ блока управления, в МПСУ децентрализованного управления линейризация производится в измерительном преобразователе. Одна и та же ГХ может быть линейризована различными способами.

Метод обратной функции. Зависимость выходного напряжения u измерительного преобразователя от измеряемого параметра λ технологического процесса задается градуировочной характеристикой $u=f(\lambda)$. Тогда измеряемый параметр находится с помощью обратной функции $\lambda=f^{-1}(u)$.

Этот метод линейризации достаточно очевиден и при известной функции $f(\lambda)$ не дает погрешности. Однако при всех указанных преимуществах он мало применяется на практике по следующим причинам:

1. Из-за сложных физических процессов, протекающих в первичных измерительных преобразователях, и множества входящих факторов теория измерительных преобразователей не дает выражений градуировочных характеристик, совпадающих с экспериментальными с приемлемой точностью.

2. В тех случаях, когда имеется приемлемое выражение для ГХ первичных измерительных преобразователей, обратная функция преобразования описывается сложными математическими выражениями, требующими при реализации больших аппаратных либо программных затрат.

Метод аппроксимации. Под аппроксимацией понимают нахождение неизвестных значений какой-либо величины по значениям других величин, связанных с рассматриваемой. Достоинство аппроксимации заключается в следующем:

сложные функции могут быть с заданной точностью определены через простые;

возможна аппроксимация ГХ, представленных таблицей.

При проведении аппроксимации важнейшее значение имеет критерий оценки погрешностей аппроксимации. В системах управления получили распространение два критерия:

1) максимальная абсолютная ошибка аппроксимации не превышает заданную (аппроксимация по максимальной ошибке);

2) среднеквадратическая ошибка аппроксимации не превышает заданную (аппроксимация по среднеквадратической ошибке).

Полиномиальная аппроксимация является одним из наиболее общих видов аппроксимации. В этом случае ГХ в рабочем диапазоне $[0, \lambda_0]$ представляется в виде

$$\varphi(\lambda) = \sum_{i=0}^n a_i \lambda^i, \quad (4.8)$$

где n — порядок аппроксимирующего полинома; a_i — постоянные коэффициенты.

При нахождении $\varphi(\lambda)$ для конкретной ГХ $f(\lambda)$ необходимую точность аппроксимации получают подбором коэффициентов и порядка полинома по выбранному критерию оценки погрешностей. В случае критерия минимума среднеквадратической ошибки могут быть получены общие выражения для коэффициентов a_i . Действительно, минимум функционала

$$I = \int_0^{\lambda_0} (f(\lambda) - \sum_{i=0}^n a_i \lambda^i)^2 d\lambda \quad (4.9)$$

обеспечивается при равенстве нулю производных от функционала по коэффициентам a_i . Для коэффициента a_0

$$\frac{\partial I}{\partial a_0} = -2 \int_0^{\lambda_0} [f(\lambda) - \sum_{i=0}^n a_i \lambda^i] d\lambda = 0,$$

$$\text{отсюда } a_0 \int_0^L d\lambda + a_1 \int_0^L \lambda d\lambda + \dots + a_n \int_0^L \lambda^n d\lambda = \int_0^L f(\lambda) d\lambda,$$

где $L = \lambda_0$ — диапазон выходных сигналов ГХ;

$$a_0 L + \frac{1}{2} a_1 L^2 + \frac{1}{3} a_2 L^3 + \dots + \frac{1}{n+1} a_n L^{n+1} = \int_0^L f(\lambda) d\lambda.$$

Обозначив $\alpha_i = a_i L^i$, получим

$$\alpha_0 + \frac{1}{2} \alpha_1 + \frac{1}{3} \alpha_2 + \dots + \frac{1}{n+1} \alpha_n = \int_0^L f(\lambda) d\lambda.$$

Проделав аналогичные преобразования для остальных коэффициентов a_i , получим систему уравнений относительно коэффициентов α_i :

$$\alpha_0 + \frac{1}{2} \alpha_1 + \frac{1}{3} \alpha_2 + \dots + \frac{1}{n} \alpha_n = \int_0^L f(\lambda) d\lambda,$$

$$\frac{1}{2} \alpha_0 + \frac{1}{3} \alpha_1 + \frac{1}{4} \alpha_2 + \dots + \frac{1}{n+1} \alpha_n = \int_0^L \lambda f(\lambda) d\lambda,$$

$$\dots$$

$$\frac{1}{n} \alpha_0 + \frac{1}{n+1} \alpha_1 + \frac{1}{n+2} \alpha_2 + \dots + \frac{1}{2n} \alpha_n = \int_0^L \lambda^n f(\lambda) d\lambda.$$

(4.10)

Решение системы уравнений (4.10) дает набор коэффициентов, минимизирующих функционал (4.9). При этом среднеквадратическая погрешность обычно рассчитывается после вычисления коэффициентов и подстановки их в выражение (4.9). Если значение среднеквадратической ошибки получилось больше заданной, то либо увеличивается степень полинома n , либо уменьшается длина отрезка L . Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое значение среднеквадратической погрешности. Поскольку процесс расчета коэффициентов полинома получился сложным, то правильным выбором начального приближения можно значительно уменьшить объем расчетов. Получим это приближение.

Полином (4.8) можно рассматривать как разложение функции $f(\lambda)$ в ряд Тейлора в точке $L/2$. В этом случае погрешность линеаризации будет эквивалентна остаточному члену разложения в форме Лагранжа:

$$R_n(\lambda) = \frac{(\lambda - L/2)^{n+1}}{(n+1)!} f^{n+1}(\xi),$$

где $f^{n+1}(\xi)$ — значение $(n+1)$ -й производной функции $f(\lambda)$ в точке ξ , расположенной на интервале $[0, L]$. Погрешность аппроксимации $\Delta u(n, L)$ в такой трактовке будет равна остаточному члену:

$$\Delta u(n, L) = R_n(\lambda) \leq \frac{L^{n+1}}{(n+1)! 2^{n+1}} f_{\max}^{n+1}, \quad (4.11)$$

где f_{\max}^{n+1} — максимальное значение производной f^{n+1} на интервале $[0, L]$.

Если степень полинома n фиксирована, а необходимая точность линеаризации достигается выбором длины отрезка линеаризации L , то первое приближение для L необходимо выбирать из условия

$$L \geq \left(\frac{\Delta u_{зад} 2^{n+1} (n+1)!}{f_{max}^{n+1}} \right)^{\frac{1}{n+1}}, \quad (4.12)$$

где $\Delta u_{зад}$ — заданное значение погрешности аппроксимации.

Если при аппроксимации фиксируется длина отрезка L , а необходимая точность достигается изменением степени полинома, то первое приближение необходимо выбрать из условия (4.11), которое решается численными методами для конкретной функции $f(\lambda)$.

Выражения (4.11) и (4.12) записаны для случая, когда погрешность аппроксимации задана в виде отклонения напряжения измерительного преобразователя. Часто задаются погрешностью аппроксимации в виде отклонения $\Delta \lambda(nL)$ измеряемого параметра λ .

Для этого случая с учетом соотношения $\Delta \lambda = f' \Delta u$ из (4.11) и (4.12) получим аналогичные оценки:

$$\begin{aligned} \Delta \lambda(n, L) &\leq \frac{L^{n+1}}{(n+1)! 2^{n+1}} \left(\frac{f^{(n+1)}}{f'} \right)_{max}, \\ L &\geq \left(\Delta \lambda_{max} (n+1)! 2^{n+1} \left(\frac{f^{(n+1)}}{f'} \right)_{min} \right)^{\frac{1}{n+1}}, \end{aligned} \quad (4.13)$$

где f' — производная функция $f(\lambda)$; L — длина отрезка линеаризации по оси λ .

При аппроксимации ГХ одним полиномом во всем диапазоне измеряемого параметра при высоких требованиях к точности аппроксимации требуется высокая степень полинома. При практической реализации это требует больших затрат машинного времени. Понизить степень полинома, как видно из соотношения (4.11), можно уменьшением диапазона изменения измеряемой величины. Для этого весь диапазон измеряемой величины разбивается на ряд поддиапазонов, для каждого из которых выбирается своя аппроксимирующая функция. В этом случае для получения значения измеряемого параметра сначала находят поддиапазон (отрезок, в котором он располагается), а затем по аппроксимирующей функции этого поддиапазона — значение измеряемого параметра. Аппроксимацию с разбивкой на поддиапазоны называют кусочной (в данном случае кусочно-полиномиальной). При кусочной аппроксимации в ряде случаев вводится дополнительное требование непрерывности аппроксимирующих функций на концах отрезков. Это обычно требуется в прецизионных системах регулирования, в законе управления которых имеется Д-составляющая (например, ПИД), так как в данном случае при

переходе через концы отрезков может появиться ошибка, пропорциональная скачку измеряемого параметра в точке разрыва. Наибольшее распространение в МПСУ получил частный случай кусочно-полиномиальной аппроксимации при $n=1$, называемой кусочно-линейной аппроксимацией.

Кусочно-линейная аппроксимация выполняется методом наименьших квадратов. Из (4.8) при $n=1$ получим уравнение аппроксимирующей функции $\varphi(\lambda) = a_0 + a_1 \lambda$, коэффициенты которой находятся из уравнения (4.10):

$$a_0 + \frac{1}{2} a_1 L = \frac{1}{L} \int_0^L f(\lambda) d\lambda;$$

$$\frac{1}{2} a_0 + \frac{1}{3} a_1 L = \frac{1}{L^2} \int_0^L \lambda f(\lambda) d\lambda.$$

Отсюда

$$a_1 = \frac{12}{L^3} \int_0^L \lambda f(\lambda) d\lambda - \frac{6}{L^2} \int_0^L f(\lambda) d\lambda;$$

$$a_0 = 2 \left[\frac{2}{L} \int_0^L f(\lambda) d\lambda - \frac{3}{L^2} \int_0^L \lambda f(\lambda) d\lambda \right].$$

При табличном задании функции $f(\lambda)$ интегрирование в последнем выражении заменяется суммированием:

$$a_1 = \frac{12}{(N+1)^3} \sum_{i=1}^N \lambda_i f(\lambda_i) - \frac{6}{(N+1)^2} \sum_{i=0}^N f(\lambda_i);$$

$$a_0 = 2 \left[\frac{2}{N+1} \sum_{i=0}^N f(\lambda_i) - \frac{3}{(N+1)^2} \sum_{i=0}^N \lambda_i f(\lambda_i) \right].$$

Из (4.11) и (4.13) для $n=1$ оценки погрешности аппроксимации составят

$$\Delta u(1, L) \leq \frac{L^2}{4 \cdot 2!} f''_{\max};$$

$$\Delta \lambda(1, L) \leq \frac{L^2}{4 \cdot 2!} \left(\frac{f'}{f} \right)_{\max}.$$

Отсюда оценка длины отрезка

$$L \geq 2 \sqrt{\frac{2 \Delta u_{\max}}{f''_{\max}}};$$

$$L \geq 2 \sqrt{2 \Delta \lambda_{\max} \left(\frac{f'}{f} \right)_{\max}}, \quad (4.14)$$

a число отрезков

$$m \leq \frac{\lambda_n - \lambda_m}{L} = (\lambda_n - \lambda_m) \sqrt{\frac{f_{\max}^2}{8 \Delta u_{\max}}}$$

$$m \leq (\lambda_n - \lambda_m) \sqrt{\frac{1}{8 \Delta \lambda_{\max}} \left(\frac{L}{f} \right)_{\max}^2} \quad (4.15)$$

где $\lambda_n - \lambda_m$ — пределы изменения измеряемого параметра λ .

Из (4.15) видно, что требуемое число m отрезков аппроксимации определяется второй производной ГХ при задании погрешности в виде напряжения и отношением второй производной к первой — при задании погрешности в виде отклонения измеряемого параметра.

В табл. 4.7 представлены результаты линеаризации описанным методом ТЭП различных градуировок при заданной максимальной погрешности линеаризации. Из таблицы видно, что при увеличении погрешности в 2 раза число кусочно-линейных отрезков уменьшается в 1,5 раза, что говорит о хорошем приближении оценок (4.14), (4.15).

В табл. 4.8 приведены координаты узлов кусочно-линейной аппроксимации градуировочной характеристики ПП, указанной в табл. 4.7. Такое представление результатов позволяет их использовать для линеаризации как прямой, так и обратной ГХ. При этом температура T и напряжение в промежутках между узлами рассчитываются по формулам

$$T = T_i + \frac{T_{i+1} - T_i}{u_{i+1} - u_i} (u - u_i);$$

$$u = u_i + \frac{u_{i+1} - u_i}{T_{i+1} - T_i} (T - T_i)$$

при $u_i \leq u \leq u_{i+1}$, $T_i \leq T \leq T_{i+1}$, где u_i/T_i ; u_{i+1}/T_{i+1} — координаты i -го и $(i+1)$ -го узлов; u — термоЭДС ТЭП при температуре T горячего спая.

Кусочно-линейная аппроксимация по критерию максимальной погрешности позволяет уменьшить объем вычислений по сравнению с критерием среднеквадратической ошибки при расчете коэффициентов аппроксимации для ГХ без перегибов. Исходными

Таблица 4.7. Зависимость числа отрезков от заданной погрешности линеаризации

Вид термопары	Диапазон измерения, С	Погрешность линеаризации, С			
		0,1	0,2	0,5	1,0
ХК	0...600	13	8	6	4
ХА	0...1100	15	11	8	4
ПП	0...1300	29	20	12	9
ПР	300...1600	39	27	17	12

Примечание: ХК — хромель-копель; ХА — хромель-алюмель; ПП — платино-платиновый; ПР — платино-родиевый.

переходе через концы отрезков может появиться ошибка, пропорциональная скачку измеряемого параметра в точке разрыва. Наибольшее распространение в МПСУ получил частный случай кусочно-полиномиальной аппроксимации при $n=1$, называемой кусочно-линейной аппроксимацией.

Кусочно-линейная аппроксимация выполняется методом наименьших квадратов. Из (4.8) при $n=1$ получим уравнение аппроксимирующей функции $\varphi(\lambda) = a_0 + a_1 \lambda$, коэффициенты которой находятся из уравнения (4.10):

$$a_0 + \frac{1}{2}a_1 L = \frac{1}{L} \int_0^L f(\lambda) d\lambda;$$

$$\frac{1}{3}a_0 + \frac{1}{3}a_1 L = \frac{1}{L^2} \int_0^L \lambda f(\lambda) d\lambda.$$

Отсюда

$$a_1 = \frac{12}{L^3} \int_0^L \lambda f(\lambda) d\lambda - \frac{6}{L^2} \int_0^L f(\lambda) d\lambda;$$

$$a_0 = 2 \left[\frac{2}{L} \int_0^L f(\lambda) d\lambda - \frac{3}{L^2} \int_0^L \lambda f(\lambda) d\lambda \right].$$

При табличном задании функции $f(\lambda)$ интегрирование в последнем выражении заменяется суммированием:

$$a_1 = \frac{12}{(N+1)^3} \sum_{i=1}^N \lambda_i f(\lambda_i) - \frac{6}{(N+1)^2} \sum_{i=0}^N f(\lambda_i);$$

$$a_0 = 2 \left[\frac{2}{N+1} \sum_{i=0}^N f(\lambda_i) - \frac{3}{(N+1)^2} \sum_{i=0}^N \lambda_i f(\lambda_i) \right].$$

Из (4.11) и (4.13) для $n=1$ оценки погрешности аппроксимации составят

$$\Delta u(1, L) \leq \frac{L^2}{4 \cdot 2!} f''_{\max};$$

$$\Delta \lambda(1, L) \leq \frac{L^2}{4 \cdot 2!} \left(\frac{f'}{f} \right)_{\max}.$$

Отсюда оценка длины отрезка

$$L \geq 2 \sqrt{\frac{2 \Delta u_{\max}}{f''_{\max}}};$$

$$L \geq 2 \sqrt{2 \Delta \lambda_{\max} \left(\frac{f'}{f} \right)_{\max}}. \quad (4.14)$$

a число отрезков

$$m \leq \frac{\lambda_n - \lambda_m}{L} = (\lambda_n - \lambda_m) \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{8 \Delta u_{\max}}}$$

$$m \leq (\lambda_n - \lambda_m) \sqrt{\frac{1}{8 \Delta \lambda_{\max}} \left(\frac{\sigma}{\sigma'} \right)_{\max}} \quad (4.15)$$

где $\lambda_n - \lambda_m$ — пределы изменения измеряемого параметра λ .

Из (4.15) видно, что требуемое число m отрезков аппроксимации определяется второй производной ГХ при задании погрешности в виде напряжения и отношением второй производной к первой — при задании погрешности в виде отклонения измеряемого параметра.

В табл. 4.7 представлены результаты линейризации описанным методом ТЭП различных градуировок при заданной максимальной погрешности линейризации. Из таблицы видно, что при увеличении погрешности в 2 раза число кусочно-линейных отрезков уменьшается в 1,5 раза, что говорит о хорошем приближении оценок (4.14), (4.15).

В табл. 4.8 приведены координаты узлов кусочно-линейной аппроксимации градуировочной характеристики ПП, указанной в табл. 4.7. Такое представление результатов позволяет их использовать для линейризации как прямой, так и обратной ГХ. При этом температура T и напряжение в промежутках между узлами рассчитываются по формулам

$$T = T_i + \frac{T_{i+1} - T_i}{u_{i+1} - u_i} (u - u_i);$$

$$u = u_i + \frac{u_{i+1} - u_i}{T_{i+1} - T_i} (T - T_i)$$

при $u_i \leq u \leq u_{i+1}$, $T_i \leq T \leq T_{i+1}$, где u_i/T_i ; u_{i+1}/T_{i+1} — координаты i -го и $(i+1)$ -го узлов; u — термоЭДС ТЭП при температуре T горячего спая.

Кусочно-линейная аппроксимация по критерию максимальной погрешности позволяет уменьшить объем вычислений по сравнению с критерием среднеквадратической ошибки при расчете коэффициентов аппроксимации для ГХ без перегибов. Исходными

Таблица 4.7. Зависимость числа отрезков от заданной погрешности линейризации

Вид термопары	Диапазон измерения, С	Погрешность линейризации, С			
		0,1	0,2	0,5	1,0
ХК	0...600	13	8	6	4
ХА	0...1100	15	11	8	4
ПП	0...1300	29	20	12	9
ПР	300...1600	39	27	17	12

Примечание: ХК — хромель-копель; ХА — хромель-алюмель; ПП — платино-платино-родий; ПР — платино-родиевый.

Таблица 4.8. Кусочно-линейная аппроксимация градуировочной характеристики ТЭП ПП

Диапазон изменения, С	Погрешность линейаризации, С	Координаты узлов линейных участков $\frac{u_i}{I_i} \quad \frac{m \cdot B}{C}$										
0...1300	0,1	0	0,113	0,234	0,297	0,431	0,608	0,754	0,946	1,228	1,478	1,779
		0	20	40	50	70	95	115	145	175	205	240
		2,068	2,360	2,823	3,440	3,922	4,315	5,065	5,525	6,095	6,780	7,317
		275	305	355	420	470	510	585	630	685	750	800
		8,249	8,807	9,607	10,128	10,891	11,784	12,925	13,167			
		885	935	1005	1050	1115	1190	1285	1305			
0...1300	0,2	0	0,143	0,297	0,501	0,754	1,066	1,394	1,823	2,268	2,917	3,728
		0	25	50	80	115	155	195	245	295	365	450
		4,464	5,218	6,095	6,887	7,754	8,751	9,953	11,187	13,046	13,167	
		525	600	685	760	840	930	1035	1140	1295	1305	
0...1300	0,5	0	0,234	0,536	0,947	1,521	2,268	3,440	4,664	5,939	7,317	8,864
		0	40	85	140	210	295	420	545	670	800	940
		10,655	13,167									
		1095	1305									
0...1300	1,0	0	0,363	0,947	1,779	3,012	4,814	6,780	8,978	11,544	13,167	
		0	60	140	240	375	560	750	950	1170	1305	

данными для решения задачи аппроксимации являются градуировочная характеристика $f(\lambda)$, диапазон изменения параметра λ , а также максимально допустимая погрешность $\pm \delta$ и линейаризации.

Выбор аппроксимирующей прямой для данного способа линейаризации поясняется рис. 4.6, а. Сначала задается начало отрезка λ_m и оценивается минимальная его длина по формулам

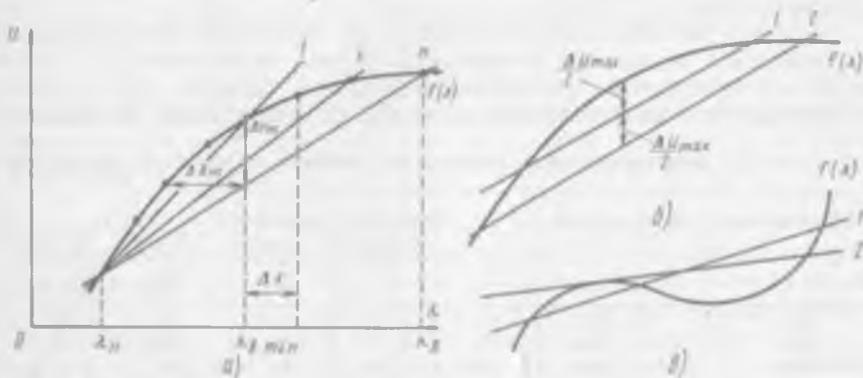


Рис 4.6. Пояснение алгоритма линейаризации по критерию максимальной погрешности:

а - выбор длины отрезка; б, в - уменьшение погрешности линейаризации смещением хорды

(4.14). Затем через точки λ_n и $\lambda_{n \min}$ проводится прямая l . Поскольку функция погрешности аппроксимации на концах интервала $[\lambda_n, \lambda_{n \min}]$ равна нулю, то согласно теореме Ролля функция погрешности внутри этого интервала имеет, по крайней мере, один экстремум.

Если в пределах начального отрезка ГХ не имеет точек перегиба (вторая производная отлична от нуля, а влияние производных высших порядков несущественно), то единственный экстремум располагается в окрестности центра отрезка и максимальная погрешность линейризации

$$\Delta u_{\max} = f\left(\frac{\lambda_{n \min} + \lambda_n}{2}\right) - \frac{f(\lambda_{n \min}) + f(\lambda_n)}{2}.$$

Если выполняется неравенство

$$|\Delta u_{\max}| < 2\delta u, \quad (4.16)$$

то длина отрезка увеличивается на шаг $\Delta\lambda$. Через точки $f(\lambda_n)$ и $f(\lambda_{n \min} + \Delta\lambda)$ снова проводится прямая, оценивается погрешность линейризации и т. д.

Если неравенство (4.16) не выполняется, то длина отрезка уменьшается на шаг и рассчитываются либо коэффициенты аппроксимации

$$a_1 = \frac{f(\lambda_n) - f(\lambda_n)}{\lambda_n - \lambda_n},$$

$$a_0 = f(\lambda_n) - \frac{\lambda_n}{\lambda_n - \lambda_n} (f(\lambda_n) - f(\lambda_n)) + \delta u,$$

либо координаты узлов линейных отрезков

$$u_n = f(\lambda_n + \delta u);$$

$$u_n = f(\lambda_n + \delta u).$$

Последние два выражения составлены с учетом параллельного сдвига аппроксимирующей прямой (l на рис. 4.6, б) на величину $0,5\Delta u_{\max} = \delta u$, что позволяет уменьшить абсолютную погрешность в 2 раза.

После этого переходят к расчету следующего отрезка, начало которого располагают в точке окончания предыдущего. Указанная процедура повторяется до получения коэффициентов линейризации во всем диапазоне изменения параметра λ .

Если в пределах линейного отрезка ГХ имеются перегибы, то функция ошибок имеет несколько экстремумов (рис. 4.6, в). В этом случае для исключения ошибок необходимо анализировать поведение ГХ в большем числе точек, а также кроме сдвига первоначального отрезка (l на рис. 4.6, в) корректировать его наклон (прямая 2 на рис. 4.6, в). Это можно сделать с помощью метода

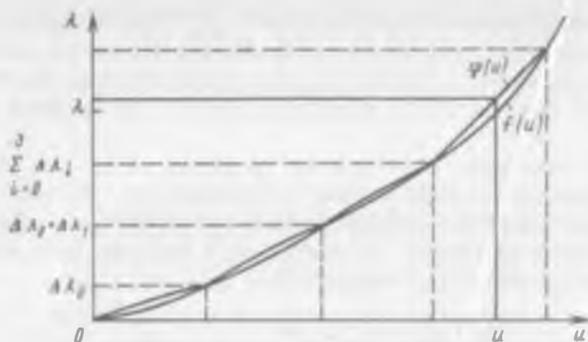


Рис. 4.7. Кусочно-линейная аппроксимация при одинаковой длине отрезков

наименьших квадратов. Поскольку области точек перегиба могут быть заранее определены по ГХ и число их невелико, то усложнение расчетов будет несущественным.

Кусочно-линейная аппроксимация при одинаковой длине отрезков в пределах диапазона изменения параметра. При этом способе аппроксимации задается ГХ $f(\lambda)$, максимальная погрешность аппроксимации $\delta\lambda$ в диапазоне $[0, \lambda_n]$. Требуется определить необходимое число отрезков m .

Этот метод линеаризации поясняется рис. 4.7. Здесь весь диапазон изменения напряжения с выхода первичного преобразователя разбивается на отрезки равной длины. Обычно их число выбирают кратным степени 2. Поскольку ГХ преобразователя нелинейна, то приращения измеряемого параметра $\Delta\lambda$ при изменении напряжения в пределах одного отрезка оказываются неравными, поэтому ГХ может быть описана массивом приращений $\Delta\lambda_i$. В этом случае значение измеряемого параметра λ находится следующим образом:

$$\lambda = \int_{i=0}^{k-1} \Delta\lambda_i + \Delta\lambda_k \left(\frac{u}{u_n} m - k \right), \quad (4.17)$$

где $k = \left[\frac{u}{u_n} m \right]$ — целая часть числа $\frac{u}{u_n} m$; u_n — верхний предел термоЭДС преобразователя; $m = 2^c$ — число отрезков.

Выражение (4.17) иногда используют в виде

$$\lambda = \lambda_{k-1} + (\lambda_k - \lambda_{k-1}) \left(\frac{u}{u_n} m - k \right), \quad (4.18)$$

где $\{\lambda_{k-1}, k-1\}$, $\{\lambda_k, k\}$ — координаты узлов кусочно-линейных отрезков.

Выражения (4.17), (4.18) наиболее удобны для практической реализации во вторичных преобразователях, так как требуют минимального объема памяти для хранения коэффициентов, при этом операция умножения на 2^c в двоичной системе исчисления заменяется сдвигом на c разрядов, что упрощает вычисления.

Координаты узлов λ_k кусочно-линейной функции могут выбираться любым способом, в том числе описанным выше. При этом дополнительное условие заключается в непрерывности кусочно-линейной функции. Кроме того, их можно выбирать на ГХ в виде хорд (см. рис. 4.6, а). В табл. 4.9 приведены результаты расчета приращения для ТЭП ПП при числе отрезков 64. На рис. 4.8, б приведены результаты расчета огибающей (кривая 5 на рис. 4.8, а) погрешностей линеаризации (кривая 4 на рис. 4.8, а) для указанных ТЭП. По табл. 4.9 и рис. 4.8 можно определить приращения $\Delta\lambda_j$ и погрешности линеаризации для меньшего числа отрезков. Например, для 32 отрезков

$$\Delta\lambda_j(32) = \sum_{i=2s}^{2j+1} \Delta\lambda_i(64);$$

$$\delta\lambda_j(32) = 0,5 [\Delta\lambda_{2j}(64) - \Delta\lambda_{2j+1}(64)] + \delta_{2j}(64),$$

где $\delta\lambda_j(32)$ — погрешность линеаризации на j -м отрезке при общем числе отрезков 32; $\delta\lambda_{2j}(64)$ — погрешность линеаризации (рис. 4.8, б) при числе отрезков 64.

Таблица 4.9. Коэффициенты линеаризации $\Delta\lambda_i$ градуировочной характеристики ПП при одинаковой длине отрезков

i	$\Delta\lambda_i$	i	$\Delta\lambda_i$	i	$\Delta\lambda_i$	i	$\Delta\lambda_i$
0	35,6	16	21,5	32	19,2	48	17,5
1	31,5	17	21,2	33	19,2	49	17,7
2	28,9	18	21,2	34	19,1	50	17,5
3	27,7	19	21,0	35	18,9	51	17,4
4	26,1	20	20,8	36	18,8	52	17,3
5	25,4	21	20,6	37	18,7	53	17,5
6	24,8	22	20,4	38	18,6	54	17,1
7	23,8	23	20,5	39	18,6	55	17,2
8	23,5	24	20,3	40	18,5	56	17,2
9	23,3	25	20,1	41	18,4	57	17,1
10	22,7	26	19,9	42	18,2	58	17,0
11	22,3	27	19,9	43	18,0	59	17,1
12	22,1	28	19,7	44	18,0	60	17,1
13	21,9	29	19,6	45	17,9	61	17,0
14	21,7	30	19,6	46	17,8	62	17,0
15	21,6	31	19,5	47	17,8	63	16,9

4.5. АЛГОРИТМЫ ДИАГНОСТИКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Автоматическая диагностика работоспособности технологического оборудования, включая микропроцессорные технические средства управления, является важнейшим средством обеспечения их высокой надежности. Применение в системах управления микропроцессорных устройств и микроЭВМ существенно повысило эффективность диагностики оборудования, основными задачами которой являются обнаружение и локализация отказов. По мере дальнейшего освоения оборудования, глубокого изучения технологических процессов и на основе этого создания банка данных отказов оборудования и динамики их развития во времени, будет создана возможность не только обнаруживать отказы, но и прогнозировать их.

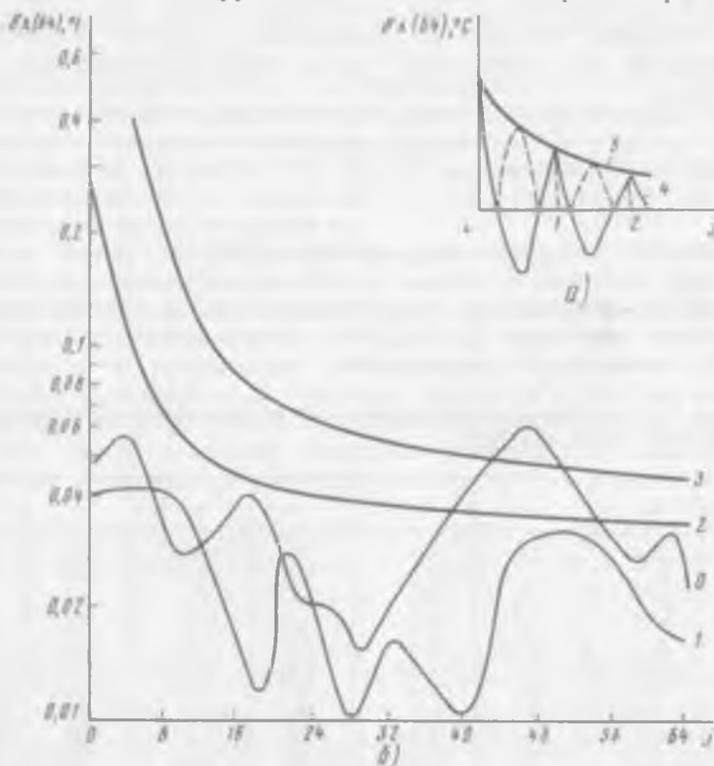


Рис. 4.8. Погрешности кусочно-линейной аппроксимации ГХ ТЭП при одинаковой длине отрезков:

a — общий вид зависимости от номера отрезка; *b* — результаты расчета огибающей максимальной погрешности на отрезке

(0 — ХК, 0, 600 С; 1 — ХА, 0, 1100 С; 2 — ПП, 0, 1300 С; 3 — ПР 30.6, 300...1600 С)

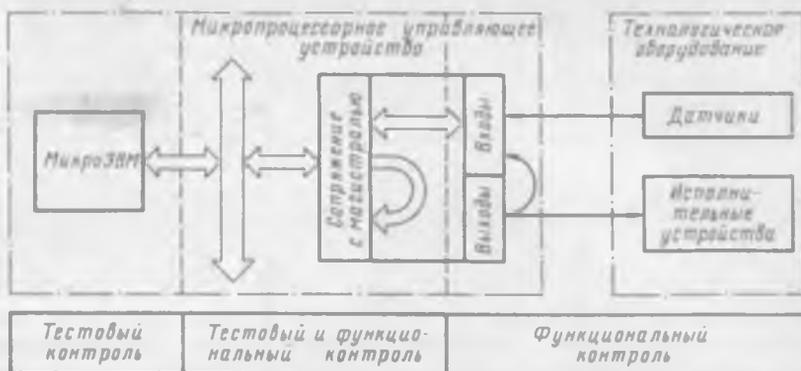


Рис. 4.9. Структурная схема МПСУ оборудованием и способы ее диагностирования

Автоматическое диагностирование работоспособности оборудования производится путем функционального или тестового контроля. Функциональный диагностический контроль позволяет на основе сравнения фактической работы механизмов и устройств с предусмотренными функциями в управляющей программе оценить правильность работы и исправность технологического оборудования. Тестовое диагностирование производится путем подачи на диагностируемый объект специальных тестовых воздействий и сравнения реакции объекта на эти воздействия с эталонными ответами.

В технологическом оборудовании используются оба способа диагностирования. На рис. 4.9 показана структурная схема микропроцессорной системы управления оборудованием и возможные способы диагностирования работы отдельных частей системы. Следует отметить, что подобное разделение достаточно условно и на практике могут использоваться оба способа одновременно.

Если диагностика производится в реальном масштабе времени, то ее реализация возможна лишь при наличии аппаратной, информационной и временной избыточности.

Под аппаратной избыточностью понимается наличие в технических средствах микропроцессорного управления и в системе управления оборудованием специальных устройств, позволяющих проверить работоспособность как отдельных элементов, так и целых агрегатов. Так, в модулях «Орион-3» имеется схемная возможность при запросе микроЭВМ прочитать информацию, которая была выдана для управления объектом, проверив тем самым работоспособность магистрали, приемопередатчиков и внутренних регистров модулей.

Информационная избыточность предполагает получение от объекта управления информации, которая может не использовать-

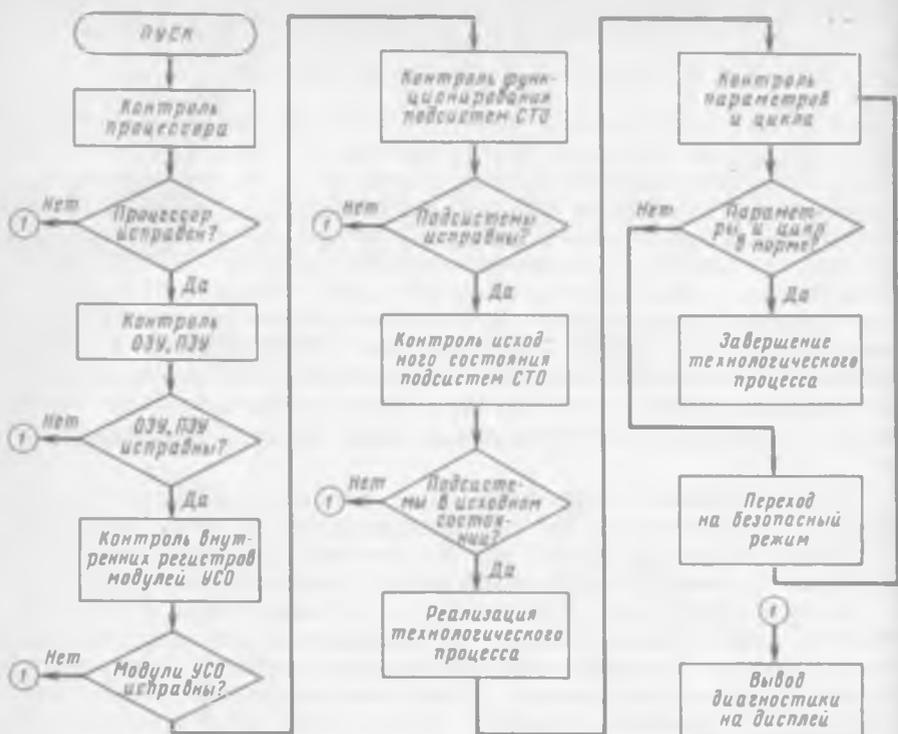


Рис. 4.10. Алгоритм диагностики микропроцессорной системы управления

ся в процессе управления, но позволяет определить состояние датчиков, измерительных устройств, исполнительных и других механизмов за счет разработки специальных диагностических алгоритмов и программ.

Временная избыточность позволяет без нарушения технологического процесса произвести требующиеся при управлении расчеты по различным эквивалентным алгоритмам и по результатам определить работоспособность технических средств управления.

В алгоритмах управления технологическим оборудованием пока широко используются аппаратная и информационная избыточности.

Микропроцессорная система управления должна решать следующие задачи диагностики (рис. 4.10):

- определять собственное работоспособное состояние;
- определять правильность начального функционирования всех подсистем технологического оборудования (вакуумной, газовой, термической и других подсистем);

- контролировать работоспособность подсистем и точность реализации технологических процессов при их проведении;

переводить установку в безопасный режим и локализовывать место неисправности.

МикроЭВМ при включении системы проверяет состояние ПЗУ и ОЗУ. Постоянное ЗУ проверяется путем вычисления контрольной суммы, а диагностирование рабочей зоны ОЗУ производится с помощью теста «бегущая единица».

Работоспособность центрального процессора, например микроЭВМ «Электроника-60М», определяется по наличию импульсов напряжения на шине. При выходе из строя процессора схема индикации наличия импульсов выдает соответствующий сигнал.

Совместная работа микроЭВМ и модулей УСО может быть проверена по специальным тестовым программам, которые позволяют микроЭВМ последовательно записать в каждый модуль эталонную информацию и затем ее прочитать. При таком способе диагностирования остаются непроверенными выходные и входные схемы модулей. Если предусматривать контроль правильности генерации внешних команд путем их считывания через входы модулей УСО, то это может привести к чрезмерному росту аппаратных средств. Поэтому целесообразней интегральную диагностику выходных цепей модулей УСО, кабелей, исполнительных устройств и датчиков проводить в режиме функционального контроля. В этом случае невозможна локализация отказов до элементов и устройств, вышедших из строя, но может быть получена информация о неработающем канале управления. При этом существенно экономятся аппаратные средства.

Функциональная диагностика может реализовываться следующими путями: по контролю состояния устройства и по контролю отклика объекта управления. Если исполнительные устройства имеют блок-контакты, дающие информацию о состоянии устройства, то по этим сигналам алгоритм диагностики определит, сработало это устройство или нет при выдаче на него управляющей команды.

Если же исполнительное устройство не имеет возможности выдать сигнал состояния, то по ожидаемому изменению других подсистем оборудования можно определить правильность его функционирования. Например, правильность функционирования откачной системы можно определить по длительности времени откачки с момента ее включения. При этом увеличение этой длительности может свидетельствовать и о развивающемся отказе откачных средств. Отказ клапанов газовых магистралей может быть выявлен по показаниям датчиков расхода газов.

Правильность функционирования устройств с аналоговым выходом датчиков, регуляторов, специальных преобразователей оценивается по отклонению значения параметра от заданного. При этом могут устанавливаться несколько уровней допускового контроля: для сигнализации о возможной неисправности, о необходимости принятия мер оператором и об аварийном положении, при котором установка должна перейти в безопасный режим.

Вариантов функциональной диагностики довольно много и при создании каждой установки это является предметом анализа и разработки соответствующих алгоритмов.

4.6. МЕТОДЫ АТТЕСТАЦИИ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

Высокие требования, предъявляемые к качеству ИМС, заставляют уделять существенное внимание проверке точности соблюдения режимов работы технологического оборудования. Порядок такой проверки регламентируется соответствующими ГОСТ.

В ГОСТ 8.002—71 «Организация и порядок проведения проверки, ревизии и экспертизы средств измерения» устанавливаются следующие виды проверок: первичная, проводимая при запуске изделия в производство; периодическая, которая указывается в технической документации, и внеочередная, проводимая по мере необходимости. Данный ГОСТ распространяется на средства измерения, однако его рекомендации применимы и для средств автоматизации, имеющих точностные характеристики. Примерами таких средств служат локальные системы регулирования перемен-

Таблица 4.10. Нормируемые метрологические характеристики (ГОСТ 23222—78)

Группа	Вид характеристики	Обозначение	Применение	
			СИ	СА
Точностные	Номинальная	$f_n(x)$	+	+
	Статистическая		—	—
	Систематическая погрешность	Δ_c	+	+
	Случайная составляющая погрешности	Δ	+	+
	Погрешность	Δ	+	+
	Вариация выходного сигнала	h	+	+
	Входное полное сопротивление	$Z_{\text{вх}}$	+	+
	Выходное полное сопротивление	$Z_{\text{вых}}$	+	+
	Динамическая		—	—
Прочие	Неинформативные параметры выходного сигнала	—	+	—
	Функция влияния	$\Psi(\xi)$	+	—
	Наибольшее допустимое изменение характеристик от внешних помех	$\Delta I(\xi)$	+	—
	Диапазон измерений	—	+	—
	Выходной код	—	+	—

Примечание: СИ — средства измерения; СА — средства автоматизации; σ — среднеквадратическое отклонение; M — математическое ожидание; ξ — фактор, влияющий на выполнение функций; x — измеряемая величина

ными технологического процесса (температура в рабочем пространстве, расход вещества и т. п.).

Сопоставление метрологических характеристик средств измерения и точностных характеристик средств автоматизации, установленных ГОСТ 23.222—78 «Нормируемые метрологические и точностные характеристики», приведено в табл. 4.10. При проектировании МПСУ характеристики, включаемые в техническую документацию, выбираются из второго столбца таблицы. Способ нормирования характеристик устанавливается в соответствии с ГОСТ 8.009—84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерения» (шестой столбец таблицы), а основная область назначения указана в последнем столбце.

Анализ табл. 4.10 показывает, что при определении погрешности средств измерения и автоматизации рекомендуется использовать одни и те же показатели. Для того чтобы установить соответствие показателей МПСУ требованиям технологического процесса, предусматривается метрологическое обеспечение системы, которое включает в себя:

технические средства — образцовые приборы и источники информации;

программное обеспечение для обработки результатов измерений;

Способ нормирования	Назначение
Алгебраический, графический, табличный Предел допустимого значения Предел $\sigma_n(\Delta)$ Предел Δ или $M\{\Delta\}$ Пределы вариации Значение полного сопротивления То же Уравнение, временные или комплексные частотные характеристики Значения по каждому фактору То же —»— —»—	Обоснование области применения технических средств Качество выполнения функции То же —»— —»— Совместимость технических средств То же Обоснование области применения и качество выполнения функций Совместимость технических средств Оценка качества в зависимости от условий применения То же Обоснование области применения и совместимость технических средств Совместимость технических средств

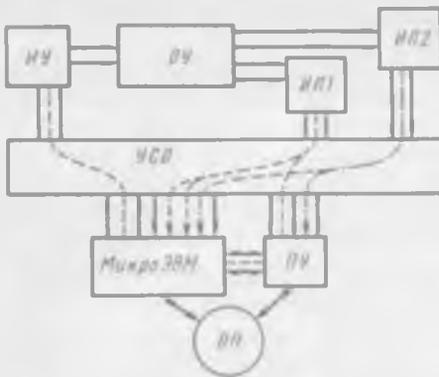


Рис. 4.11. Модель потока информации в МПСУ

организационные мероприятия, устанавливающие порядок проверок, ответственность персонала за их проведение, и документирование результатов поверочных испытаний.

В составе метрологического обеспечения может использоваться микроЭВМ, которая выполняет функции генератора воздействий, сбора и обработки информации.

Для выявления особенностей оценки точности МПСУ составим модель потоков информации (рис. 4.11). В качестве элементов модели выделим: объект управления (ОУ); исполнительные устройства (ИУ); измерительные преобразователи (ИП), используемые в системах управления и применяемые для измерения и контроля ОУ, не входящие в замкнутые контуры управления; устройство сопряжения с объектов (УСО); микроЭВМ и пульт управления (ПУ), с помощью которых реализуется алгоритм управления и взаимодействия с оператором (ОП).

Связь между элементами показана двойными стрелками, потоки измерительной информации — штрихпунктирными линиями, а управляющей — штриховыми. Выделим пути распространения информации, используемые при измерении и контроле:

ОУ — ИП1 — УСО — микроЭВМ — ПУ;

ОУ — ИП1 — УСО — ПУ;

ОУ — ИП2 — УСО — микроЭВМ — ПУ;

ОУ — ИП2 — УСО — ПУ

и при управлении:

микроЭВМ — УСО — ИУ — ОУ;

микроЭВМ — УСО — ИУ — ОУ — ИП1 — УСО — микроЭВМ.

Будем называть комплекс технических средств, используемых для передачи информации, каналом и различать каналы замкнутые и разомкнутые. Построим модели для определения точностных характеристик этих каналов (рис. 4.12).

В состав моделей входят:

объект управления (ОУ), измерительные преобразователи выходной переменной (ИП_в) и возмущающего воздействия (ИП_φ),

экстраполирующее устройство (ЭУ), образующие вместе приведенную непрерывную часть (ПНЧ) системы;

генератор задающего воздействия (ГЗВ), алгоритм управления (АУ), импульсный элемент (ЭИ), составляющие дискретную часть (ДЧ) системы.

Погрешность на выходе канала определим по формуле $e(t) = y_0(t) - y(t)$,

где $y_0(t)$ — значение выходной переменной, полученное расчетом и принимаемое за базовое; $y(t)$ — значение выходной переменной, измеренное при проверке. При расчете $y_0(t)$ используются модели разомкнутого (МРК) и замкнутого (МЗК) каналов.

Поскольку $e(t) = f(g, \Psi t)$ и зависит от параметров канала, то она служит полной характеристикой погрешности и может быть использована для оценки методической составляющей при определении точностных характеристик.

К методическим погрешностям относятся все погрешности, которые могут быть определены и количественно оценены с помощью формализованного описания измерительной процедуры и результатов измерений. Все остальные погрешности относятся к инструментальным.

Оценка погрешности согласно ГОСТ 8.508—84 «Метрологические характеристики средств измерений и точностные характеристики средств автоматизации ГСП» выполняется либо по отношению к входу, либо по отношению к выходу изделия. Для замкнутых систем

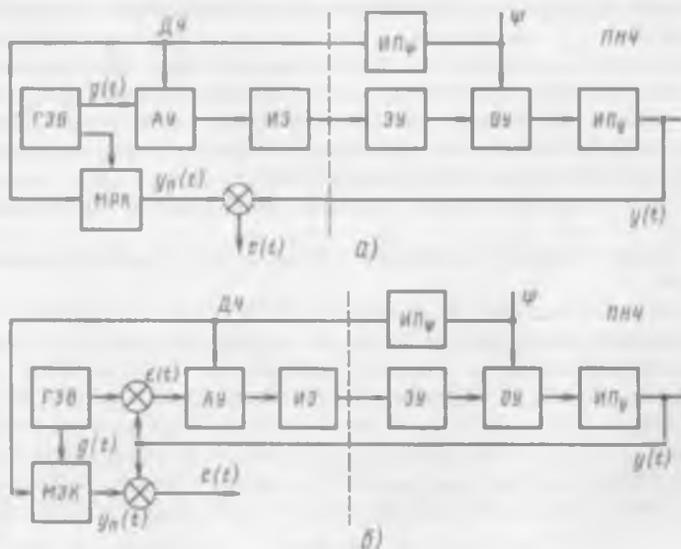


Рис. 4.12. Модели для определения точностных характеристик:

а) разомкнутая система; б) замкнутая система

вместо входа удобно использовать значения ошибки системы, получаемые на выходе устройства сравнения $\varepsilon(t)$ рис. 4.12, б.

При аттестации каналов выполняются:

расчет базового значения выходной переменной;

расчет методической погрешности замкнутого канала;

определение точностных характеристик канала.

В соответствии с ГОСТ 8.508—84 предварительная информация, которая используется при испытаниях, включает в себя: математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение рассматриваемой характеристики; объем выборки по каждой точностной характеристике; перечень испытываемых точек в диапазоне измерений.

При проведении проверок необходимо учитывать дрейф, вариации и случайные составляющие погрешности, установленные техническими условиями на изделие. Если эти показатели не нормированы, рекомендуется считать случайную составляющую $\Delta_c(t)$ существенной, если $\max \Delta_c(t) > 0,2\Delta_d$, где Δ_d — допустимое значение погрешности.

При точной оценке случайная составляющая считается несущественной, если ее значение на интервале, оцениваемое с заданной доверительной вероятностью, не выходит за установленные границы, т. е.

$$P[\Delta_d < \Delta_c < 1,2\Delta_d] = 1 - \alpha,$$

где уровень значимости α выбирается из ряда чисел 0,1; 0,05; 0,01. При этом полагают, что закон распределения погрешности нормальный.

Погрешность дрейфа и вариацию считают существенными, если в оценочных испытаниях они превышают $0,2\Delta_d$, а при точных — $0,1\Delta_d$. Если при испытаниях значение случайной составляющей существенно, то границей служит $0,3\sigma_d$ допустимого значения среднеквадратической ошибки.

Число и расположение испытываемых точек рекомендуется выбирать:

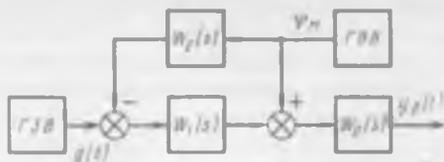
при существенной вариации — 5, 25, 50, 75, 95% диапазона измерения;

при несущественной вариации — 0, 25, 50, 75, 100%.

Рассмотрим методики расчета в предположении, что динамические характеристики каналов линейны. Основанием этому допущению служит, во-первых, то, что каналы часто проектируются линейными. Для этого в системе предусматриваются специальные аппаратные и программные средства. Во-вторых, при проведении испытаний можно так выбрать испытываемые точки, чтобы наблюдаемые изменения переменных допускали линейную аппроксимацию.

Расчет базовой величины. Модели каналов МРК и МЗК имеют ту же структуру, что и сами каналы (рис. 4.12). Полагая характеристики элементов

Рис. 4.13. Структурная схема разомкнутого канала системы управления



линейными, а период квантования пренебрежимо малым, запишем для разомкнутого канала (рис. 4.12, а):

$$Y_0(s) = W'_{\Delta Y}(s) W'_{\text{пнч}}(s) G(s) + [W''_{\text{пнч}}(s) - W'_{\Delta Y}(s) W'_{\text{пнч}}(s)] \Psi(s), \quad (4.19)$$

где $y_0(s)$, $G(s)$, $\Psi(s)$ — изображение выходной переменной и воздействий соответственно; $W'_{\Delta Y}(s)$, $W''_{\Delta Y}(s)$ — передаточные функции алгоритмов управления по задающему $g(t)$ и возмущающему $\Psi(t)$ воздействиям; $W'_{\text{пнч}}(s)$, $W''_{\text{пнч}}(s)$ — передаточные функции приведенной непрерывной части по $g(t)$ и $\Psi(t)$.

Для модели замкнутого канала в соответствии с рис. 4.12, б

$$Y_0(s) = \frac{W_{\Delta Y}(s) W_{\text{пнч}}(s)}{1 + W_{\Delta Y}(s) W_{\text{пнч}}(s)} G(s) + \frac{W_{\text{пнч}}(s) - W_{\Delta Y}(s) W_{\text{пнч}}(s)}{1 + W_{\Delta Y}(s) W_{\text{пнч}}(s)} \Psi(s) \quad (4.20)$$

Обозначив передаточные функции соединений элементов в (4.19) и (4.20) $W'_{\Delta Y}(s)$ и $W'_{\Psi}(s)$, получим $y_0(t)$ с помощью обратного преобразования Лапласа:

$$y_0(t) = L^{-1}\{W'_{\Delta Y}(s) G(s)\} + L^{-1}\{W'_{\Psi}(s) \Psi(s)\} = \int_0^t k_{\Delta Y}(\tau) g(t-\tau) d\tau + \int_0^t k_{\Psi}(\tau) \Psi(t-\tau) d\tau, \quad (4.21)$$

где L^{-1} — оператор обратного преобразования Лапласа, $k_{\Delta Y}(\tau)$, $k_{\Psi}(\tau)$ — импульсные переходные функции по $g(t)$ и $\Psi(t)$ соответственно.

Выражения (4.19) — (4.21) позволяют рассчитать базовые значения $y_0(t)$ для оценки погрешности, приведенной к выходной переменной. Покажем порядок выполнения этих расчетов на примере модели разомкнутого канала рис. 4.13.

Модель включает в себя объект управления с передаточной функцией $W_0(s)$, управляющее устройство $W_1(s)$, измерительный преобразователь возмущающего воздействия $W_2(s)$ и генераторы задающего ГЗВ и возмущающего ГВВ воздействия.

Полная характеристика канала

$$Y_0(s) = W_1(s) W_0(s) G(s) + W_0(s) (1 - W_1(s) W_2(s)) \Psi(s).$$

Первое слагаемое характеризует погрешность воспроизведения измеряемой величины или задающего воздействия, а второе отражает влияние условий, в которых передается информация. Так, проведение измерений в нормальных условиях, установленных ГОСТ 12977—76 «ГСП. Промышленные приборы и средства автоматизации. Общие технические требования», позволяет рассчитать y_0 для определения основной погрешности. Вычисление дополнительной погрешности проводится в испытываемых точках, устанавливаемых заданием $g(t)$, при изменении $\Psi(t)$ в пределах, указанных в технической документации.

Пример 4.1. Рассчитать базовые значения y_0 для проверки основной погрешности канала (рис. 4.13).

Характеристики канала:

$$W_1(s) = k_1, \quad W_0(s) = \frac{1}{T_0 s + 1}, \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2 s + 1}, \quad k_1 = 10, \quad T_0 = 10 \text{ с}, \quad T_2 = 1 \text{ с}, \quad k_2 = 0.05.$$

Характеристики воздействий: $\Psi(t) = \Psi_n 1(t)$, $\Psi_n = 1$.

Диапазон изменения $g(t) = 0 \dots 1$. Испытуемые точки: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1.

Решение:

$$Y_0(s) = \frac{k_1 g}{T_0 s + 1} + \frac{1}{T_0 s + 1} \left[1 - \frac{k_1 k_2}{T_2 s + 1} \right] \frac{\Psi_0}{s} \quad (4.22)$$

Основная погрешность измеряется в установившемся режиме, поэтому, используя теорему о конечном значении преобразования Лапласа, получаем

$$y_0 = \lim_{s \rightarrow 0} s Y_0(s) = k_1 g + (1 - k_1 k_2) \Psi_n.$$

Подставляя числовые значения, получаем $y_0 = 10g_0 + 0,5\Psi_n$. Отсюда имеем: $g = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$ и $y_0 = 0,5; 3; 5,5; 8; 10,5$. Эти значения получены в предположении $t \rightarrow \infty$, что не дает ответа на вопрос, когда следует проводить измерения после приложения воздействий.

Пользуясь таблицами обратного преобразования Лапласа, найдем для уравнения (4.22):

$$\begin{aligned} y_A(t) &= k_1 g_0 (1 - e^{-t/T_0}) + (1 - k_1 k_2) \Psi_n \left[\frac{T_2}{1 - k_1 k_2} \frac{e^{-t/T_0} - e^{-t/T_2}}{T_0 - T_2} - 1 + \frac{T_0 e^{-t/T_0} - T_2 e^{-t/T_2}}{T_2 - T_0} \right] = \\ &= k_1 g_0 (1 - e^{-t/T_0}) + \frac{(1 - k_1 k_2) \Psi_0}{T_0 - T_2} \cdot \\ &\left[\left(\frac{T_2}{1 - k_1 k_2} - T_0 \right) e^{-t/T_0} + \left(T_2 - \frac{T_2}{1 - k_1 k_2} \right) e^{-t/T_2} + (T_0 - T_2) \right] \end{aligned}$$

Выберем моменты измерения $t = 4T_0$, тогда после вычислений получим $y_0(t) = 4T_0 = 9,8g_0 + 0,49\Psi_n$ или при $g_0 = \Psi_n = 1$ $y_0 = 10,29$.

Сопоставление результатов, полученных по теоремам о конечном значении и рассчитанных в заданный момент времени, указывает на наличие систематической

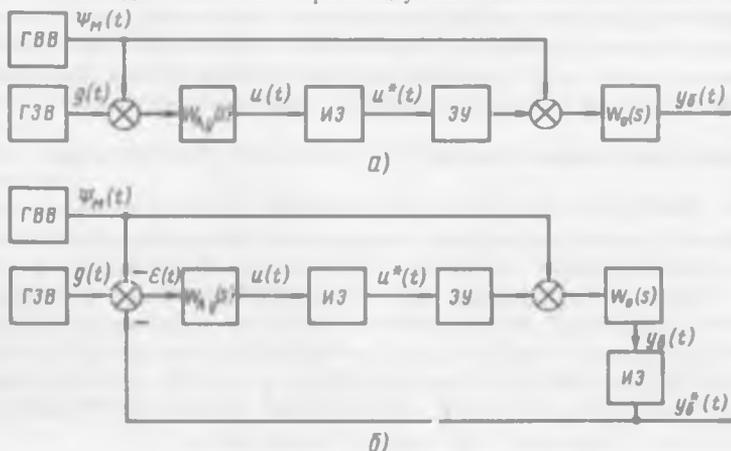


Рис. 4.14. Модели для аттестации дискретных каналов:
а — разомкнутая МРК, б — замкнутая МЭК

погрешности. Отсюда следует необходимость обоснования времени измерения в зависимости от требований к допустимой погрешности при аттестации системы.

Модели каналов МРК и МЗК для случая, когда частотой квантования нельзя пренебречь, приведены на рис. 4.14. На рис. 4.14 использованы те же обозначения, что и на рис. 4.12 и 4.13. Характеристику измерительного преобразователя ИП_φ будем считать включенной в $W(s)$. Пользуясь преобразованием Лапласа и его дискретным аналогом Z-преобразованием, запишем полную характеристику разомкнутого канала:

$$U^*(s) = W_1(s) [G(s) - \Psi(s)]; \quad Y_0(s) = W_G(s) W_{\phi}(s) + W_0(s) \Psi(s),$$

где $W_{\phi}(s)$ — передаточная функция экстраполятора; $U^*(s)$ — преобразование Лапласа решетчатой функции:

$$Y_0(s) = W_0(s) W_{\phi}(s) [W_1(s) G(s) - W_1(s) \Psi(s)]^* + W_0(s) \Psi(s).$$

Будем считать, что измерение $y(t)$ проводится в дискретные моменты времени, и применим Z-преобразование к последнему выражению:

$$Y(z) = Z \{ W_0(s) W_{\phi}(s) W_1(s) G(s) \} - Z \{ W_0(s) W_{\phi}(s) W_1(s) \Psi(s) \} + \\ + Z \{ W_0(s) \Psi(s) \} = Z \{ W_0(s) W_{\phi}(s) W_1(s) G(s) \} + Z \{ W_0(s) [1 - W_{\phi}(s) W_1(s)] \Psi(s) \}$$

Для замкнутого канала аналогично предыдущему запишем:

$$E(s) = G(s) - \Psi(s) - Y^*(s);$$

$$U^*(s) = [W_1(s) \{ G(s) - \Psi(s) - Y^*(s) \}]^*;$$

$$Y_0(s) = W_0(s) W_{\phi}(s) U^*(s) + W_0(s) \Psi(s).$$

Выполнив Z-преобразование, получим

$$Y_0(z) = Z \{ W_0(s) W_{\phi}(s) [Z \{ W_1(s) G(s) - Z \{ W_1(s) \Psi(s) - Z \{ W_1(s) \} Y(z) \} + \\ + Z \{ W_0(s) \Psi(s) \} \} \},$$

откуда

$$Y_0(z) = \frac{Z \{ W_0(s) W_{\phi}(s) \} Z \{ W_1(s) G(s) \} + Z \{ W_0(s) \Psi(s) \} - Z \{ W_0(s) W_{\phi}(s) \} Z \{ W_1(s) \Psi(s) \}}{1 + Z \{ W_0(s) W_{\phi}(s) \} Z \{ W_1(s) \}}.$$

Пользуясь правилами обратного преобразования, можно вычислить значение $y_0(t) = y_0(nT_0)$ в любой момент $t = nT_0$.

Расчет методической погрешности замкнутого канала. Расчет точностных характеристик согласно ГОСТ 8.508—84 может выполняться либо приведением к выходу, либо приведением к входу. Расчеты, выполняемые приведением к входу для каналов, обладающих динамическими характеристиками, связаны с вычислением обратных операторов, что, в свою очередь, сопряжено с большими трудностями, поскольку обратные операторы реальных систем физически не реализуемы, и численные методы в этом случае имеют существенную погрешность. Поэтому удобно использовать методическую погрешность ошибки замкнутой системы.

Используя (4.20), можно записать (см. рис. 4.12):

$$E(s) = G(s) - Y_0(s) = \frac{1}{1 + W_{\text{авт}}(s) W_{\text{инс}}(s)} G(s) +$$

$$+ \frac{W_{\text{пнч}}(s) - W'_{\text{лн}}(s) W'_{\text{пнч}}(s)}{1 + W'_{\text{лн}}(s) W_{\text{пнч}}(s)} \psi(s).$$

Установившееся значение $e(t)$ при $t \rightarrow \infty$ можно получить, пользуясь теоремами о конечном значении для непрерывного или дискретного преобразования Лапласа.

При расчете погрешности воспроизведения программного воздействия необходимо кроме отклонения выходной переменной от желаемого значения учитывать и отклонения производных. Эти отклонения оцениваются с помощью коэффициентов ошибок.

Экспериментальное определение точностных характеристик канала. Общая погрешность канала складывается из погрешности за счет вариации показаний измерительных преобразователей, дрейфа характеристик элементов канала и внешних воздействий. При проверке канала можно вычислять значения вариации и дрейфа, а также выделять систематическую и случайные составляющие. При планировании и обработке результатов эксперимента следует соблюдать требования ГОСТ 8.508—84. Информация, которая может быть использована при получении оценок погрешности или ее точного значения, приведена в табл. 4.11.

Методики проведения экспериментов установлены для оценки и контроля точностных характеристик для пренебрежимо малой вариации и вариации, вносящей существенный вклад в общую погрешность.

Точностные характеристики при пренебрежении вариацией получаются при подаче на вход канала (изделия) в испытываемых точках диапазона сигнала x_j и n -кратного измерения выходной переменной. При оценке характеристик $n=3...10$, при получении точных значений $n \approx 100$ в каждой испытываемой точке.

Методика оценки точностных характеристик при существенной вариации заключается в n -кратном подходе к испытываемой точке диапазона со стороны меньших и больших значений входного сигнала x_j и однократном измерении выходной переменной при каждом подходе. При оценке характеристик $n=1...10$ и получении точных значений число испытаний, проводимых при увеличении и уменьшении x_j , должно быть не менее 50.

Контроль точностных характеристик заключается в сравнении полученных оценок с допуском, установленным в технической или нормативной документации на изделие.

Рассмотрим, следуя ГОСТ 8.508—84, алгоритмы обработки результатов испытаний. Алгоритм обработки информации при оценке погрешности без учета вариации заключается в следующем.

1. Вычислить $\Delta_i = y_M - y_{B_i}$.
2. Найти $\max |\Delta_i|$.

Здесь y_M — базовое значение выходной переменной в испытываемой точке; y_{B_i} — зна-

чение переменной в точке j , полученное в эксперименте i . Вместо y_{ij} можно использовать среднее значение \bar{y}_i .

Задача контроля заключается в проверке неравенства $\max |\Delta_{ij}| \leq \Delta_n$, где Δ_n — допустимое значение абсолютной погрешности.

При оценке вариации и абсолютной погрешности, приведенной к выходной переменной, алгоритм обработки информации заключается в следующем.

1. Вычислить

$$\Delta_{\delta y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_{\delta i} - f_n(x_{\delta i})];$$

$$\Delta_{m y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_{m i} - f_n(x_{m i})]; \quad b_y = |\Delta_{\delta y} - \Delta_{m y}|.$$

2. Образовать массивы

$$\Delta_{ij} = \begin{cases} \Delta_{m i j} = \frac{1}{2} [y_{m i j} - f_n(x_{m i})] = \frac{b_y}{2} & \text{при } i = \overline{1, n}; \\ \Delta_{\delta i j} = \frac{1}{2} [y_{\delta i j} - f_n(x_{\delta i})] = \frac{b_y}{2} & \text{при } i = \overline{n+1, 2n}. \end{cases}$$

3. Найти $\max |\Delta_{ij}|$. Контроль осуществляется сравнением $\max |\Delta_{ij}|$ с допустимым значением.

Оценку вариации можно дать совместно с относительной и приведенной погрешностями. В этих случаях в алгоритме значения абсолютной погрешности заменяются соответственно на относительные или приведенные значения погрешностей, полученные при испытаниях.

Оценку погрешности можно получить по отношению к входному воздействию. Для этого необходимо знать обратную статическую характеристику $x = f_n^{-1}(y)$. При оценке систематической и случайной составляющих погрешностей по отношению к выходной переменной обработка результатов измерений обеспечивает нахождение среднего значения переменной и среднеквадратического отклонения.

Алгоритм обработки информации заключается в вычислении

$$\Delta_{\delta y} = y_i - f_n(x_i); \quad \Delta_{c y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{ij}; \quad \sigma_y(\Delta) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_{ij} - \Delta_{c y})^2}.$$

Контроль осуществляется сравнением $\Delta_{c y}$ и $\tau(\Delta)$ с допустимыми значениями.

Оценка систематической и случайной составляющих погрешности при учете вариации включает в себя раздельное формирование рядов погрешностей, полученных при подходах со стороны

больших и меньших значений x_j , и комбинации полученных результатов с целью исключения вариации.

Алгоритм обработки информации, использующий абсолютную погрешность, заключается в вычислении

$$\bar{\Delta}_{\Delta y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\Delta_{\Delta y i} - f_{\Delta}(x_{\Delta i})];$$

$$\bar{\Delta}_{\Delta y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\Delta_{\Delta y i} - f_{\Delta}(x_{\Delta i})]; \quad \theta_{\Delta y} = \frac{\Delta_{\Delta y i} + \bar{\Delta}_{\Delta y}}{2};$$

$$\sigma_y(\hat{\theta}) = \frac{1}{2n-1} \left[\sum_{i=1}^n (\Delta_{\Delta y i} - \bar{\Delta}_{\Delta y})^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta_{\Delta y i} - \bar{\Delta}_{\Delta y})^2 \right];$$

Здесь $\theta_{\Delta y}$ — систематическая составляющая погрешности; $\sigma_y(\hat{\theta})$ — среднеквадратическое отклонение случайной составляющей.

Аналогичные вычисления можно выполнить, используя приведение к входу и значениям относительной или приведенной погрешности.

При оценке погрешности и ее составляющих в случае линейного дрейфа переменной используется вычисление первой разности наблюдаемого ряда измерений. Если при этом вариация не учитывается, то алгоритм обработки информации заключается в следующем.

1. Устранить дрейф. Вычислить:

$$\Delta_{iy} = y_{j-1} - y_{0j}; \quad \Delta_{iy}^1 = \Delta_{i+1, j} - \Delta_{iy}; \quad k_d = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta_{iy}^1; \quad \theta_{iy}^* = \Delta_{iy} - k_d j.$$

2. Оценить погрешность $\theta_{iy} = \max |\theta_{iy}^*|$.

3. Вычислить систематическую составляющую погрешности $\theta_{cy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{iy}^*$.

4. Вычислить среднеквадратическое отклонение $\sigma_y(\hat{\theta}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\theta_{iy}^* - \theta_{cy})^2}$.

Здесь θ_{iy}^* — абсолютная погрешность; k_d — коэффициент дрейфа.

Алгоритм расчета погрешности при учете вариации, кроме указанного выше, включает в себя построение рядов погрешности при увеличении и уменьшении x_j . Исключение составляющей дрейфа производится в этих рядах, а определение максимальной погрешности, систематической и случайной составляющих проводится способами, аналогичными рассмотренным ранее.

5.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Использование программного управления существенно сокращает время разработки системы на основе микропроцессоров, облегчая задачу логического проектирования, упрощая внесение изменений в ходе работы над проектом и при модернизации уже существующих систем.

Под программным обеспечением (ПО) понимается совокупность программ, используемых в процессе подготовки и решения задач в МПСУ. В соответствии с выполняемыми функциями программное обеспечение микропроцессорных систем (МПС) разделяется на следующие виды:

системное (СПО), или операционную систему (ОС), т. е. комплекс программных средств, обеспечивающих разработку программ и организацию вычислительного процесса;

прикладное (ППО), т. е. совокупность программ, непосредственно выполняющих управление объектом и обработку поступающей информации;

разработки, или систему автоматизации программирования (САП), т. е. совокупность программных средств, используемых на всех этапах разработки программ для МПС — от ввода программы на исходном языке до проверки функционирования программ в реальном масштабе времени;

организации вычислительного процесса, т. е. совокупность программ, предназначенных для организации вычислительного процесса в МПС и контроля ее функционирования как при реализации прикладных задач, так и при использовании МПС для разработки ПО.

Совокупность программ, реализуемых в данной МПС, называется ее резидентным ПО. Программное обеспечение, предназначенное для определенной МПС, но реализованное на других, программно не совместимых с ней вычислительных средствах, называется кроссовым ПО данной МПС. Кросс-САП позволяет разрабатывать ПО для универсальных микроЭВМ большой или средней мощности. Использование кросс-САП дает возможность создавать ПО одновременно с разработкой аппаратуры. Отладка программ при этом производится на программной модели микроЭВМ, являющейся частью кросс-САП. Однако для кросс-

САП невозможно учесть все особенности внешнего окружения микроЭВМ, поэтому необходима дополнительная отладка на реальной микроЭВМ с учетом реальной среды. Резидентная САП работает на той же ЭВМ, для которой создается ПО. Этот метод наиболее распространен при реализации САП на универсальных микроЭВМ.

Трудоемкость программирования и качество разрабатываемого ПО в значительной степени определяются используемыми разработчиком языками программирования, которые принято делить на три класса: машинные языки, язык ассемблера и языки высокого уровня.

Команды машинного языка представляются в виде цифровых кодов, непосредственно воспринимаемых аппаратными средствами. С помощью машинных команд реализуют такие простые операции, как «Ввести в микропроцессор двоичный код из устройства ввода с определенным адресом», «Сравнить введенный код с кодом, хранящимся в ячейке ЗУ с определенным адресом», «Переслать содержимое регистра А в ячейку ЗУ с заданным адресом» и т. п.

Команды на языке ассемблера имеют вид мнемонических обозначений, а адреса ячеек ЗУ и константы могут быть представлены не последовательностью битов, а символами. Например, команда пересылки данных из регистра А в регистр В на языке ассемблера имеет вид: MOV А, В. Заметим, что для выполнения операций, которые описываются всего несколькими строками естественного языка человека, требуется использовать достаточно большое число команд языка ассемблера.

Исследования показали, что время написания и отладки программы, а также трудность ее понимания и обслуживания пропорциональны числу команд и отчасти сложности каждой команды. Поэтому большинство программ записывают на языках высокого уровня Фортран, Бейсик, PL M, Паскаль, которые позволяют выполнять наиболее распространенные операции, такие как вычисление выражений, присваивание значений, условные действия и др., используя в каждом случае только один оператор данного языка высокого уровня. Более того, способы записи программ на языках высокого уровня, например на языке Паскаль, облегчают их разработку, понимание и обслуживание.

Рассмотрим принципы построения системного ПО (операционной системы) микроЭВМ.

Вначале на конкретном примере рассмотрим структуру и функции САП — важной составляющей части СПО.

Предположим, что разработанная и закодированная программа на языке Паскаль вводится в микроЭВМ «Электроника-60». В качестве устройства ввода могут быть использованы: терминал (клавиатура и дисплей), фотосчитыватель, накопитель на гибком магнитном диске и т. п. Введенная программа записывается в

библиотеку и может быть скорректирована с помощью редактора текста. Редактор текста может использоваться неоднократно. Первоначально исправляются ошибки, которые допущены при вводе программы в микроЭВМ, затем синтаксические ошибки, которые выявляются при тестировании программы. Исполнение команд редактора текста приводит к удалению, добавлению, изменению строк, частей строк или отдельных символов.

Далее отредактированная программа подвергается автоматическому переводу (трансляции) с языка высокого уровня в последовательность машинных кодов. Существуют два вида трансляторов — компилятор и интерпретатор. Компилятор транслирует каждый оператор исходной программы в последовательность машинных кодов, реализуемых позднее при протоне программы. Интерпретатор реально выполняет программу по одному оператору. При использовании интерпретатора существенно облегчается отладка программы, в нее легко вносить изменения и дополнения. В микроЭВМ «Электроника-60» трансляция с языка Паскаль на машинный язык осуществляется последовательно в два этапа. На первом этапе программа с языка Паскаль переводится на язык ассемблера. На втором этапе осуществляется перевод с языка ассемблера в машинные коды «Электроники-60». Результатом работы транслятора с языка Паскаль является текст программы на ассемблере, а также листинг (распечатка), содержащий текст исходной программы на языке Паскаль, некоторую отладочную информацию и сообщения об обнаруженных ошибках. Результатами работы транслятора с языка ассемблера являются объектный код и листинг, в котором содержится информация об исходной программе, оттранслированной программе, относительных адресах размещения команд, а также информация о синтаксических ошибках.

На следующем этапе объектный модуль обрабатывается редактором связей. Используя информацию об относительных адресах размещения, редактор связей корректирует адресные константы собираемых программ и модифицирует таблицы внешних ссылок других программ в соответствии с заданными адресами. Результатом работы редактора связей является загрузочный модуль-программа, которая готова к исполнению. При необходимости загрузочный модуль-программа вводится в микроЭВМ с помощью загрузчика.

На последнем этапе осуществляется тестирование загрузочного модуля-программы с помощью отладочных программ, в состав которых входят: генераторы тестов; динамические отладчики, позволяющие в ходе выполнения отлаживаемой программы наблюдать за ее работой; программы вывода содержимого памяти и трассировки, выдающие содержимое оперативной памяти, названия операторов исходной программы и содержимое регистров микроЭВМ в последовательности фактического выполнения операторов и др.

Для ликвидации ошибок, обнаруженных при отладке, с помощью редактора текстов производится исправление исходной программы, а затем повторная трансляция и тестирование. Если в результате отладки программы ошибки не обнаружены, то программа отлажена и готова к использованию.

Рассмотренный процесс разработки программы и ее исполнение производятся под управлением монитора (основной управляющей программы), входящего в состав ПО организации вычислительного процесса. В функции монитора входят: запуск системных и прикладных программ, временная приостановка или завершение выполнения программы, диалог с пользователем, организация ввода-вывода, распределение системных ресурсов (памяти, времени), получение информации о состоянии операционной системы, ведение системы файлов на внешних запоминающих устройствах, диагностика ошибок внешних устройств и задач, а также некоторые другие функции.

Современные операционные системы разделяются на резидентные (РОС) и дисковые ОС (ДОС). Первые целиком размещаются в ЗУ микроЭВМ и обеспечивают минимальное время реакции на сигналы со стороны объекта управления (для РОС требуется объем памяти от 2,5 до 20 К байт). При расширении функций ОС на некотором этапе приходится переходить от резидентных ОС к дисковым, которые размещаются на магнитном диске. С диска их соответствующие компоненты вызываются в оперативную память для выполнения. Для работы ДОС требуется область оперативной памяти, объем которой не превышает объем, необходимый для РОС. Из-за задержек, связанных с обращениями к магнитному диску, ДОС работают значительно медленнее РОС.

Для отечественных микроЭВМ создан целый ряд ОС. Наиболее распространенными из них являются фоновая основная дисковая операционная система (ФОДОС) реального времени для микроЭВМ типа «Электроники-60», ОС 1800 для микроЭВМ «СМ-1800», ОС ДВК для микроЭВМ «Электроника НЦ-80-01Д», входящей в состав ДВК, и др.

5.2. ЯЗЫК АССЕМБЛЕРА МИКРОЭВМ

Язык ассемблера занимает промежуточное положение между машинными и языками высокого уровня, будучи при этом гораздо ближе к машинным языкам. Он позволяет гибко и полно использовать технические возможности ЭВМ, как и машинный язык, но благодаря применению символических имен является более простым и удобным для человека, чем машинный язык.

Язык ассемблера и транслятор с этого языка, который также называется ассемблером, обычно составляют основу для создания ПО микроЭВМ, в частности операционных систем и систем реального времени, к которым предъявляются высокие требования по объему занимаемой памяти и скорости выполнения программ.

Язык ассемблера является машинно-зависимым языком и отражает архитектурные особенности той микроЭВМ, для которой он создан. Например, в командах ассемблера содержатся способы адресации операндов и имена программно-доступных регистров, используемых в данной микроЭВМ.

Формат операторов в языке ассемблера. Программа, написанная на языке ассемблера, состоит из последовательности предложений или операторов. Каждый из операторов имеет следующий формат: метка, операция операнды, комментарии. Единственным обязательным элементом оператора является операция. Все остальные элементы могут отсутствовать.

Метка — символическое имя данного оператора, которое требуется, если, например, на оператор есть ссылка в каком-нибудь другом операторе программы. В качестве метки допускается применять начинающуюся с буквы алфавитно-цифровую последовательность знаков, причем значащими являются первые шесть символов метки.

Вслед за меткой располагается *код операции* — мнемоническое буквенное обозначение оператора. Код операции должен быть отделен от метки одним или несколькими пробелами (| |).

Поле операндов располагается вслед за кодом операции и отделено от него, одним или несколькими пробелами. Операндами могут быть переменные, константы, арифметические выражения, символы регистров и т. д. Операнды обычно отделяются друг от друга запятыми.

Комментарий всегда начинается символом «точка с запятой». В поле комментария программист может помещать произвольный текст, не влияющий на выполнение оператора и служащий для пояснения производимых действий.

Примеры операторов:

```
M1: MOV #5, R1;   пересылка числа 5 в регистр R1
ADD | R1, R2;    (R1)+(R2)→(R2)
```

Способы адресации. Все действия над операндами в микроЭВМ осуществляются посредством команд, которые хранятся в ЗУ. Существуют три типа команд: безадресные, одноадресные и двухадресные. Безадресные команды содержат только код операции, который показывает, какую операцию необходимо выполнить. Одноадресные (двухадресные) команды кроме кода операции содержат информацию об операнде (операндах).

Способы задания операндов (их адресации) в командах микроЭВМ могут быть самыми различными: операнд может содержаться непосредственно в команде (непосредственная адресация); в команде может содержаться исполнительный адрес операнда, т. е. адрес ячейки памяти, в которой хранится операнд (прямая адресация); в команде может содержаться косвенный адрес операнда, т. е. адрес ячейки памяти, в которой хранится исполнительный адрес операнда (косвенная адресация), причем для оперативного хранения операндов или их адресов в микроЭВМ могут быть использованы регистры общего назначения, входящие в состав микропроцессора.

Используемый способ адресации влияет на формат команды, объем памяти, необходимый для ее хранения (более длинные команды при хранении требуют большего числа ячеек памяти, чем более короткие), быстродействие (время выборки и исполнения команд с косвенной адресацией превышает время, необходимое для выборки и исполнения команд с прямой адресацией) и надежность работы микроЭВМ.

Таблица 5.1. Способы задания операндов в командах микроЭВМ «Электроника-60»

Способ адресации	Исполнительный адрес (ИА) операнда	Символическая запись	Код адреса
Регистровый	Регистр с номером $N=0-7$	RN	$0N$
Непосредственный	Второе слово команды — операнд	$\$ E$	27
Абсолютный	Второе-третье слово команды	$(a \$ E$	37
Косвенно-регистровый	Содержимое регистра RN	(RN)	1N
Прямой с автоувеличением	$IA = (RN), (RN) = (RN) + 2$	$(RN) +$	2N
Прямой с автоуменьшением	$IA = (RN) - 2$	$- (RN)$	4N
Прямой индексный	$IA = E + (RN)$	$E(RN)$	6N
Прямой относительный	$IA = E + (СК) + 2$	E	67
Косвенный с автоувеличением	$IA = ((RN)), (RN) = (RN) + 2$	$(a (RN) +$	3N
Косвенный с автоуменьшением	$IA = ((RN) - 2)$	$(a - (RN)$	5N
Косвенный индексный	$IA = (E + (RN))$	$(a E(RN)$	7N
Косвенный относительный	$IA = (E + (СК) + 2)$	$(a E$	77

Сформулируем требования и рекомендации по выбору способа адресации:

1) для уменьшения объема памяти и времени выборки команд необходимо использовать команды с более коротким адресом;

2) с точки зрения наиболее быстрой адресации предпочтительнее тот способ, который требует меньшего числа арифметических операций или дополнительных обращений к памяти;

3) необходимо обеспечить простой доступ к возможно большему объему памяти;

4) в некоторых случаях требуется изменять содержимое адресной части без изменения команды. Такой подход позволил бы по одной и той же программе обрабатывать массивы и таблицы любого формата;

5) так как сложные способы адресации ведут к ошибкам, следует выбирать простые способы адресации.

Наиболее полно указанным требованиям удовлетворяют способы задания операндов, используемые в командах микроЭВМ «Электроника-60» (табл. 5.1). Рассмотрим их.

Регистровый. В качестве операнда используется содержимое одного из регистров общего назначения $R0...R7$, где $0...7$ — номер регистра.

Непосредственный. Второе слово команды E , представленное восьмеричным кодом, является операндом. Например, $\$ 40$. Операнд — 40_8 .

Абсолютный. Исполнительный адрес (ИА) операнда содержится во втором-третьем слове команды. Например, $(a \$ 1000$; $IA = 1000_8$.

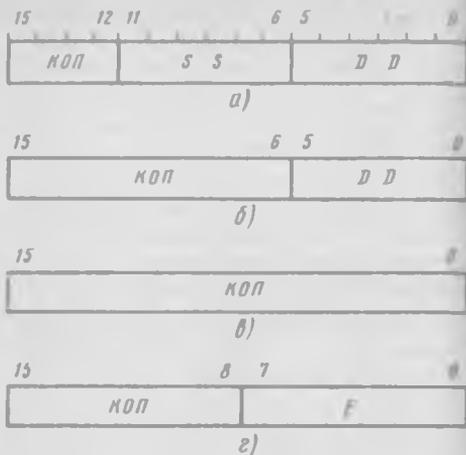
Косвенно-регистровый. Исполнительный адрес операнда содержится в регистре RN , где N — номер регистра общего назначения ($N=0,1,2,...,7$). Например, $(R2)$; $IA = (R2)$, где $(R2)$ — содержимое регистра $R2$.

Прямой с автоувеличением. Исполнительный адрес операнда содержится в регистре RN , причем после каждого обращения к регистру его содержимое увеличивается на 2.

Прямой с автоуменьшением. Исполнительный адрес операнда получается путем вычитания 2 из содержимого регистра RN .

Рис. 5.1. Форматы команд микроЭВМ «Электроника-60»:

а) двухадресных; б) одноадресных; в) безадресных команд управления и изменения признаков; г) безадресных команд включения



Прямой индексный. Исполнительный адрес операнда получается путем сложения восьмеричного кода E (индекса), заданного во втором слове команды, с содержимым регистра RN . Например, $1000 (R1)$; $IA = 1000_8 + (R1)$.

Косвенный с автоувеличением. Исполнительный адрес операнда находится в ячейке памяти с адресом (RN) , причем после каждого обращения к регистру его содержимое увеличивается на 2. Например, $(a (R0) +)$; $IA = ((R0))$, где $(R0)$ — содержимое регистра $R0$, $((R0))$ — содержимое ячейки памяти с адресом $(R0)$.

Косвенный с автоуменьшением. Исполнительный адрес операнда находится в ячейке памяти с адресом $(RN) - 2$. Например, $(a - (R0))$; $IA = ((R0) - 2)$.

Косвенный индексный. Исполнительный адрес операнда находится в ячейке памяти с адресом $E + (RN)$. Например, $(a 700 (R1))$; $IA = (700_8 + (R1))$.

Косвенный относительный. Исполнительный адрес операнда находится в ячейке памяти с адресом $E + (СК) + 2$. Например, $(a 60)$. Пусть $(СК) = 1100$, тогда $IA = (60_8 + 1100_8 + 2) = 1162$.

Система команд микроЭВМ (на примере микроЭВМ «Электроника-60»). В системе команд ЭВМ «Электроника-60» используются четыре формата, показанные на рис. 5.1.

В двухадресных командах (рис. 5.1, а) для кода операции (КОП) отведены четыре двоичных разряда 12...15. Из 16 комбинаций только 14 используются для указания кода операции этого формата, а комбинации 1000 и 0000 свидетельствуют о принадлежности команды к другим форматам.

Для кода адреса источника информации (SS) отведено шесть двоичных разрядов — 6...11, для кода адреса приемника информации (DD) (он же адрес результата) — разряды 0...5. Шесть разрядов SS или DD определяют способ адресации согласно табл. 5.1.

В одноадресных командах (рис. 5.1, б) код операции занимает 6...15 разряды, а адрес операнда DD — 0...5 разряды.

Безадресные команды изменения признаков N , Z , V , C и команды управления работой процессора и внешних устройств (рис. 5.1, в) содержат только код операции.

В командах вставки (рис. 5.1,а) в разрядах 8...15 записан код операции, а в разрядах 0...7 — код смещения E . Смещения есть приращение счетчика команд (в пределах $\pm 2^7$).

Система команд микроЭВМ «Электроника-60» представлена в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Система команд микроЭВМ «Электроника-60»

Адресность	Назначение	Символическая запись	Восьмеричный код	Признаки NZVC	Содержание команды
Двухадресные	Передача	<i>MOV(B)</i>	.1SSDD	V V 0—	(S)⇒(D) Передача
	Логические	<i>CMP(B)</i>	.2SSDD	V V 0—	(S)−(D) Сравнение чисел
		<i>BIT(B)</i>	.3SSDD	V V 0—	(S)∧(D) Проверка битов
		<i>BIC(B)</i>	.4SSDD	V V 0—	(S)∧(D)⇒(D) Очистка разрядов
		<i>BIS(B)</i>	.5SSDD	V V 0—	(S)∨(D)⇒(D) Дизъюнкция
		<i>XOR</i>	074RDD	V V 0—	<i>RV(D)⇒(D)</i> Исключающее ИЛИ
	Арифметические	<i>ADD(B)</i>	06SSDD	V V V V	Сложение (S)+(D)⇒(D)
		<i>SUB(B)</i>	16SSDD	V V V V	Вычитание (D)−(S)⇒(D)
		<i>MUL</i>	070RSS	V V 0 V	Умножение
		<i>DIV</i>	071RSS	V V V V	Деление R и <i>RV4(S)</i> ⇒ частное в R, остаток в <i>RV1</i>
Арифметические		<i>ASH</i>	072RSS	V V V V	Арифметический сдвиг R на n разрядов; n дано в (S)
	<i>ASHC</i>	073RSS	V V V V	Арифметический сдвиг R и <i>RV1</i> на n разрядов; n дано в (S)	
Одноадресные	Передача	<i>SWAB</i>	0003DD	V V 0 0	Перестановка байтов
		<i>CLR(B)</i>	.050DD	0 1 0 1	Очистка слова (D)
	Логические	<i>COM(B)</i>	.051DD	V V 0 0	Инвертирование (D)
		<i>TST(B)</i>	.057DD	V V 0 0	Проверка (D)
	Арифметические	<i>INC(B)</i>	.052DD	V V V —	Прибавление единицы к (D)
		<i>DEC(B)</i>	.053DD	V V V —	Вычитание единицы из (D)
		<i>NEG(B)</i>	.054DD	V V V V	Изменение знака (дополнение кода)
		<i>ADC(B)</i>	.055DD	V V V V	Прибавление переноса к (D)
		<i>SBC(B)</i>	.056DD	V V V V	Вычитание заема из (D)
		<i>ROR(B)</i>	.060DD	V V V V	Циклический сдвиг вправо (D)
<i>ROL(B)</i>	.061DD	V V V V	Циклический сдвиг влево (D)		

Адресность	Назначение	Символическая запись	Восьмеричный код	Признав NZIC	Содержание команды
Одноадресные	Арифметические	<i>ASR(B)</i>	.062 DD	V V V V	Арифметический сдвиг вправо (<i>D</i>)
		<i>ASL(B)</i>	.063 DD	V V V V	Арифметический сдвиг влево (<i>D</i>)
		<i>SXT</i>	.0067 D	- V - -	Расширение знака во все разряды
Одноадресные	Управление программой	<i>JMP</i>	0001 DD	- - - -	Безусловный переход по (<i>D</i>)
		<i>SOB</i>	077 RKK	- - - -	Счет циклов в <i>R</i> ; $R-1 \Rightarrow R$; УП по $R \neq 0$
		<i>JSR</i>	004 R DD	- - - -	Обращение к стандартной подпрограмме
		<i>RTS</i>	0020 R	- - - -	Возврат из стандартной подпрограммы
		<i>MFPS</i>	1067 DD	V V 0 -	Чтение слова состояния программы
		<i>MTPS</i>	1064 DD	V V V V	Запись слова состояния программы
		<i>MARK</i>	0064 KK	- - - -	Восстановление указателя стека
Безадресные	Безусловные и условные переходы	<i>BR</i>	0004E		БП
		<i>BNE</i>	0010E		УП $\neq 0$
		<i>BEQ</i>	0014E		УП $= 0$
		<i>BGE</i>	0020E		УП ≥ 0
		<i>BLT</i>	0024E		УП $<$
		<i>BGT</i>	0030E		УП $>$
		<i>BLE</i>	0034E		УП \leq
		<i>BPL</i>	1000E		УП +
		<i>BMI</i>	1004E		УП -
		<i>BXI</i>	1010E		УП $>$
		<i>BLOS</i>	1014E		УП \leftarrow
		<i>BVC</i>	1020E		УП по <i>V</i>
		<i>BVC</i>	1024		УП по <i>V</i>
		<i>BCC</i>	1030		УП по <i>C</i>
		<i>BCS</i>	1034		УП по <i>C</i>
<i>BHIS</i>	1030		УП \geq		
<i>BLO</i>	1034		УП $<$		
Безадресные	Операции над признаками	<i>CLC</i>	000241	- - - 0	Гашение <i>C</i>
		<i>SEC</i>	000261	- - - 1	Установка <i>C</i>
		<i>CLV</i>	000242	- - 0 -	Гашение <i>V</i>
		<i>SEV</i>	000262	- - 1 -	Установка <i>V</i>
		<i>CLZ</i>	000244	- 0 - -	Гашение <i>Z</i>
		<i>SEZ</i>	000264	- 1 - -	Установка <i>Z</i>
		<i>CLN</i>	000250	0 - - -	Гашение <i>N</i>
		<i>SEN</i>	000270	1 - - -	Установка <i>N</i>
		<i>CNZ</i>	000254	0 0 - -	Гашение <i>N</i> и <i>Z</i>
		<i>CCC</i>	000257	0 0 0 0	Гашение всех признаков
		<i>SCC</i>	000277	1 1 1 1	Установка всех признаков

Адресность	Назначение	Символическая запись	Восьмеричный код	Признаки VZTC	Содержание команды
Безадресные	Управление программой	<i>NOP</i>	000240		Нет операций
		<i>NALT</i>	000000		Останов
		<i>WAIT</i>	000001		Ожидание
		<i>RIT</i>	000002		Возврат из прерывания
		<i>BPT</i>	000003		Прерывание для отладки
		<i>IOT</i>	000004		Прерывание по вводу — выводу
		<i>RESET</i>	000005		Сброс ВУ
		<i>EMT</i>	1040E		Прерывание для системных программ
		<i>TRAP</i>	1044E		Командное прерывание
		<i>RTT</i>	000006		Возврат из прерывания

Примечание 0 — установка в ноль, 1 — установка в единицу, (тире) — сохранение предыдущего значения признака; V (галочка) — установка признака по результату операции; УП — условие перехода: — в командах над словами заменяется на 0, а в байтовых командах — на 1.

5.3. АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ ЯЗЫК ПАСКАЛЬ

Тенденция развития средств обработки данных такова, что стоимость программных изделий по сравнению с аппаратными неуклонно повышается, причем наиболее явно это проявляется при использовании сравнительно недорогих микропроцессоров.

В настоящее время на микроЭВМ реализуются многие распространенные языки программирования высокого уровня. Целесообразность их применения в сравнении с машинными языками и языком ассемблера обусловлена повышением производительности труда программистов, упрощением сопровождения программных систем, увеличением мобильности программного обеспечения и т. п.

Языки программирования высокого уровня обычно делят на две большие группы: процедурно- и проблемно-ориентированные.

Проблемно-ориентированные языки высокого уровня направлены на решение узкого класса задач и упрощают разработку алгоритма. Программирование ведется в понятиях, характерных для конкретной проблемной области. При этом описывается задача, а не алгоритм ее решения. Создание трансляторов с проблемно-ориентированных языков требует больших трудозатрат, поэтому их применение пока весьма ограничено.

Процедурно-ориентированные языки высокого уровня созданы для описания алгоритмов решения задач. Среди них выделяются машинно-зависимые языки высокого уровня и алгоритмические (машинно-независимые) языки.

Машинно-зависимые языки высокого уровня, например ПЛ/М, ориентированы на имеющиеся в МПС аппаратные средства. Эти языки в меньшей степени машинно-зависимы, чем язык ассемблера, так как операторы и выражения записываются в обычной для языков высокого уровня форме. Их основными характеристиками являются полное использование аппаратуры микроЭВМ, создание ясных, хорошо читаемых программ, а также удобство записи и компоновки программ. И все же ориентация машинно-зависимых языков уровня на конкретные микроЭВМ препятствует их широкому распространению.

К алгоритмическим языкам относятся: Фортран, Бейсик, Фокал, Модула-2, Ада, Паскаль и др. Основные достоинства программирования на этих языках: высокая производительность труда программиста, возможность переноса программ с одной ЭВМ на другую, простота эксплуатации, наличие средств контроля и т. п. Однако при использовании алгоритмических языков возрастает сложность создания эффективных трансляторов, увеличивается трудозатрата на написание программ, которые требуют доступа к определенным элементам памяти микроЭВМ, регистрам ввода — вывода, прерываний и т. д.

Среди алгоритмических языков высокого уровня многие авторы выделяют языки Модула-2, Ада и Паскаль. Но так как в настоящее время Модула-2 и Ада еще недостаточно распространены, одним из наиболее перспективных языков программирования следует считать язык Паскаль. Он ориентирован на структурное программирование, обладает развитыми средствами контроля, прост в изучении и использовании.

Заметим, что при структурном программировании программа представляет собой совокупность вложенных друг в друга блоков (программных модулей), каждый из которых должен иметь один вход и один выход, а для реализации этих блоков используются две управляющие конструкции: цикл и принятие решения. При этом решаемая задача расчленяется на подзадачи, которые, в свою очередь, подвергаются декомпозиции на подзадачи более низкого уровня; процесс продолжается до тех пор, пока составляющие блоки не будут настолько малы, что способ их реализации станет очевидным.

Конкретные реализации языка Паскаль содержат возможности, обеспечивающие использование всех аппаратных средств микроЭВМ. Знание языка Паскаль полезно при изучении и использовании целого ряда современных языков программирования, таких как Ада и Модула-2. Немаловажным фактором с точки зрения распространения языка является то, что трансляторы с языка Паскаль входят в состав ПО многих отечественных микроЭВМ.

В связи с вышеизложенным дадим краткое описание языка Паскаль.

Основные определения алгоритмического языка Паскаль. *Символы языка* — основные неделимые знаки, с помощью которых пишутся все тексты на языке. Алфавит языка Паскаль содержит следующие символы:

прописные латинские буквы *A, B, C, ..., Z*;
прописные русские буквы *А, Б, В, ..., Я*;
арабские цифры *0, 1, 2, ..., 9*;
специальные символы, например, *: = + - () ; .*

Примечание: в некоторых версиях языка Паскаль допускаются строчные латинские и русские буквы.

Кроме того, в языке определяются служебные слова, такие как *AND, ARRAY, BEGIN, CASE* и др.

Идентификаторы — имена основных объектов языка: констант, типов, процедур, функций, файлов. Идентификатор — это последовательность букв или цифр, начинающейся с буквы, например *CONST2, ТАБЛИЦА*.

Длина идентификаторов ограничена только допустимой длиной вводимой в ЭВМ строки. Однако распознаются идентификаторы по первым восьми знакам, т. е. комбинация первых восьми букв и цифр каждого идентификатора должна быть единственной. В языке Паскаль существует набор стандартных идентификаторов, обозначающих стандартные константы, типы, процедуры, функции и файлы, например *TRUE, REAL, WRITE, SIN, INPUT*.

Метки. В качестве меток в языке Паскаль используются целые числа без знака. Для записи метки можно использовать не более четырех цифр. Метками обычно снабжаются операторы, которым передается управление при выполнении оператора перехода *GOTO*.

Комментарии — последовательность символов, заключенная в фигурные скобки и не содержащая в себе фигурных скобок. Комментарии поясняют смысл отдельных частей программы и могут быть поставлены в любое место программы. Комментарии игнорируются компилятором. Например,

```
PROGRAM ОБРАБОТКА (INPUT, OUTPUT); {ЗАГОЛОВОК}
```

Строка — последовательность символов, заключенная в одинарные кавычки (апострофы). Например, 'РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ':

Тип данных задает множество значений, которые могут принимать данные, совокупность операций и операторов, допустимых для данного типа, и форму представления в машине.

Структура программы на языке Паскаль. Программа на языке Паскаль состоит из заголовка, описаний и операторов (рис. 5.2). Заголовок записывается всегда как первая строка программы. В нем содержится имя программы, которое дает сам программист, и файлы (наборы данных), доступные программе. Например,

```
PROGRAM ОБРАБОТКА (INPUT, OUTPUT);
```

```

PROGRAM  ИМЯ (INPUT, OUTPUT) ;
LABEL   Раздел меток ;
CONST   - Раздел констант ;
TYPE    - Раздел типов ;
VAR     - Раздел переменных ;
PROCEDURE, FUNCTION - Раздел процедур и функций ;
BEGIN

```

Раздел операторов

END.

Рис. 5.2. Структура программы на языке Паскаль

```

PROGRAM СЧЕТ (INPUT, OUTPUT) ;
CONST PI = 3.14 ;
VAR X, R : REAL ;
BEGIN
  WRITELN ('Введите значение X :') ;
  READ (X) ;
  R = SIN (X + PI / 4) ;
  WRITELN ('R =', R:6:3) ;

```

END.

Рис. 5.3. Пример простой программы на языке Паскаль

Программа с именем ОБРАБОТКА читает данные из стандартного входного файла *INPUT*, обрабатывает их и направляет получаемые результаты в стандартный файл *OUTPUT*.

Описания определяют метки, имена и типы констант и переменных, а также применяемые процедуры и функции. Операторы указывают действия, которые будут выполняться по программе. Каждая программа на языке Паскаль содержит, по крайней мере, один оператор и хотя бы один из разделов описаний. Пример простой программы на языке Паскаль представлен на рис. 5.3. В этой программе отсутствуют описания меток, процедур и функций.

Типы данных в языке Паскаль. Под данными понимаются константы, переменные, выражения или функции. В языке Паскаль все данные классифицируются по типам, каждый из которых представляет определенное множество значений, принимаемых данными. Существуют простые и сложные (структурные) типы данных. Простые типы данных делятся на стандартные и типы данных, определяемые пользователем. К стандартным типам данных относят: целый, действительный, булевый и символьный. В сложных типах данных выделяют четыре разновидности: массивы, файлы, записи и множества.

Рассмотрим подробнее каждый из типов данных.

Тип *INTEGER* (целый). К этому типу относятся данные, значения которых принадлежат множеству целых чисел в диапазоне $[-MAXINT, +MAXINT]$, где *MAXINT* является величиной, зависимой от разрядности ЭВМ. Для 16-разрядного микропроцессора *MAXINT* = 32767. Пример из раздела описания переменных:

VAR I, J, K: INTEGER; {переменные *I, J, K* — целого типа}

Тип *REAL* (действительный). К этому типу относятся данные, значения которых принадлежат множеству действительных чисел, допустимых в данной машине. Пример из раздела описания переменных:

VAR B, C: REAL; {переменные *B* и *C* относятся к действительным числам}

Тип *BOOLEAN* (булевый). К этому типу относятся данные, которые принимают только два значения: *TRUE* или *FALSE* («1» или «0»). Пример из раздела описания переменных:

VAR X₁, X₂, F: BOOLEAN; {переменные *X₁*, *X₂*, *F* — булевого типа}

Тип *CHAR* (символьный). К этому типу относятся данные, состоящие из символьных переменных или констант, допустимых в данной машине. Символьная константа состоит из последовательности символов, заключенных в апострофы, например

'*SUMMA*', '*T*', '*ТАБЛИЦА*', '+'

Для символьного типа переменных и констант определены функции преобразования, связывающие значение символа с его порядковым номером в упорядоченном наборе символов языка. Например, функция *ORD(C)* определяет порядковый номер произвольного символа *C* из заданного набора символов.

Пример из раздела описания:

CONST C = 'ПАРАМЕТР';

VAR A, B: CHAR;

{переменные *A* и *B* — символьного типа}

В языке Паскаль предусмотрено несколько классов типов данных, определяемых пользователем, например перечислимый и ограниченный. Использование типов данных, определяемых пользователем, в ряде случаев позволяет разработать более качественную программу. В языке реализован формальный механизм для нахождения нечисловых перечислимых типов данных, на значения которых в программе можно ссылаться посредством нечисловых обозначений (имен).

Перечислимые типы данных вводятся в программу в раздел описания типов, например

TYPE ПАРАМЕТР = (температура, давление, расход, влажность);

После определения типа данных могут быть объявлены его переменные:

VAR P: ПАРАМЕТР;

Это означает, что переменная *P* может принимать значения: температуры, давления, расхода, влажности.

Упорядоченная последовательность значений, составляющих перечислимый тип данных, нумеруется, начиная с нуля, а над данными перечислимых типов могут выполняться операции сравнения, например:

(расход > влажность) = (3 > 4) = *FALSE* (ложно),

(расход > давление) = (3 > 2) = *TRUE* (истинно).

К *ограниченному типу данных* относятся элементы подмножества подряд идущих величин любого простого типа, за исключением действительного. Ограниченный тип данных определяется в

разделе описания типов первым и последним значениями подмножества подряд расположенных величин в разделе. Например:

```
TYPE ЦИФРА = 0..9;  
      СИМВОЛ = 'A'..'F';  
VAR Ц: ЦИФРА;  
     S: СИМВОЛ;
```

Массив — упорядоченный набор однотипных элементов с произвольным доступом. Каждый элемент имеет индекс. Индекс в языке Паскаль заключается в квадратные скобки, например А [1], В [К]. Совокупность элементов, составляющая массив, упорядочена по значениям индексов. Массив содержит ограниченное число элементов.

Массив можно объявить в разделе описания переменных следующим образом:

```
VAR <ИМЯ МАССИВА>: ARRAY [n..m] OF <БАЗОВЫЙ  
ТИП>;
```

где *n* и *m* начальное и конечное значения индекса массива соответственно.

Пример из раздела описания переменных типа массив:

```
VAR X, Y: ARRAY [1..K] OF BOOLEAN;
```

X, Y — переменные, значения которых принадлежат массиву, состоящему из булевых элементов, пронумерованных от 1 до *K*.

Файл — упорядоченный набор произвольного числа однотипных элементов с последовательным доступом. Это означает, что в отличие от массивов, в файлах место каждого элемента не определено индексом, число элементов не задано и каждый элемент файла становится доступным только после перебора всех предшествующих компонентов. Длины файлов не определены в описаниях, но каждый файл имеет конец, называемый признаком конца файла. Каждому файлу ставится в соответствие функция *EOF*, которая принимает значение *TRUE*, если достигнут конец файла, и значение *FALSE*, если конец не достигнут.

Пример из раздела описания переменных типа файл:

```
VAR  
АЛФАВИТ: FILE OF CHAR; {файл символов}  
В: FILE OF INTEGER; {файл целых чисел}
```

Запись — совокупность ограниченного числа логически связанных компонентов, принадлежащих к различным типам. Компоненты записи, называемые полями, различаются по именам полей.

Пример из раздела описания записи:

```
TYPE СТРОКА СЛОВАРЯ = RECORD;  
      СЛОВО: PACKED ARRAY [1..16] OF CHAR;  
      ЗНАЧЕНИЕ: PACKED ARRAY [1..20] OF CHAR;  
      END;
```

```
VAR T, S, L: СТРОКА СЛОВАРЯ;
```

В данном случае это упакованные массивы разной длины.

Множество — ограниченная совокупность различных элементов простого типа. Пример:

```
TYPE ЦВЕТ = (ФИОЛ, СИНИЙ, ГОЛУБ, ЗЕЛ, ЖЕЛТ, КРАСН);  
VAR СПЕКТР: SET OF ЦВЕТ;
```

Операторы языка Паскаль. Раздел операторов в программе на языке Паскаль начинается служебным словом *BEGIN* и заканчивается служебным словом *END*. Каждый из операторов реализует какое-либо действие. Между операторами ставится разделитель

Оператор присваивания выполняет присваивание значения выражения, записанного справа от специального символа: =, переменной, находящейся слева от этого символа.

Пример:

```
TYPE ПАРАМЕТР = (ТЕМПЕРАТУРА, ДАВЛЕНИЕ,  
РАСХОД);  
VAR P: ПАРАМЕТР ;  
K: INTEGER ;  
A: REAL ;  
  
BEGIN  
P = ТЕМПЕРАТУРА ;  
K = 1 ;  
A = 50,5 ;
```

END.

Условный оператор используется для реализации ветвлений в программах и существует в следующих формах:

1) *IF L THEN S1
ELSE S2;*

где *L* — логическое выражение; *S1*, *S2* — операторы; *IF* (если), *THEN* (тогда), *ELSE* (иначе) — служебные слова.

Если выражение *L* принимает значение *TRUE*, то выполняется оператор *S1*, а оператор *S2* пропускается. Если *L = FALSE*, то *S2* выполняется, а *S1* пропускается.

Вторая форма условного оператора является сокращенной:

2) *IF L THEN S1;*

Если *L = TRUE*, то выполняется оператор *S1*, а затем оператор, следующий за *S1*. Если *L = FALSE*, то оператор *S1* пропускается.

Операторы цикла FOR, WHILE, REPEAT используются для организации циклов (повторений).

Оператор цикла с параметром FOR используется в форме, представленной на рис. 5.4.а. В этом случае при целых значениях *i*, m_1 , m_2 приращение параметра цикла равно +1 и $m_1 < m_2$.

```
FOR I:=m1 TO m2 DO
```

```
BEGIN
```

Циклическая
часть программы

```
END;
```

а)

```
FOR I:=m, DOWNTO m2 DO
```

```
BEGIN
```

Циклическая
часть программы

```
END;
```

б)

Рис. 5.4. Структура цикла с использованием оператора *FOR*:

а — приращение параметра цикла равно +1; б — приращение параметра цикла равно -1

Циклическая часть программы заключается в операторные скобки *BEGIN*, *END*. Если циклическая часть содержит только один оператор, операторные скобки можно не указывать.

Допускается другая форма записи оператора *FOR* (рис. 5.4, б). В этом случае при целочисленных значениях i , m_1 , m_2 приращение параметра цикла равно -1 и $m_1 > m_2$.

Оператор цикла с предусловием *WHILE* используется в форме, представленной на рис. 5.5. Циклическая часть программы повторяется до тех пор, пока значение логического выражения истинно. Если значение логического выражения всегда ложно, то цикл не выполняется ни разу.

Логическое выражение может содержать следующие логические операции:

AND — логическое умножение (И);

OR — логическое сложение (ИЛИ);

NOT — отрицание;

и операции отношения:

> — больше;

<= — меньше или равно;

>= — больше или равно;

= — равно;

< — меньше;

< > — не равно.

В случае использования оператора цикла с постусловием *REPEAT* (рис. 5.6) циклическая часть программы повторяется до тех пор, пока значение логического выражения ложно.

Оператор выбора *CASE* производит выбор одного из нескольких операторов (рис. 5.7). Селектором в операторе выбора является выражение, значение которого принадлежит целому, булеву или символьному типу, либо типу, определяемому программистом. Оператор выбора имеет *CASE* — список с элементами и представляет собой оператор, перед которым записывается одна или несколько констант, отделяемых от него двоеточием. Эти константы должны иметь такой же тип, как селектор. Для выполнения будет выбран тот оператор, перед которым стоит константа, равная значению селектора. Например,

```
WHILE < логическое выражение > DO  
BEGIN
```

Циклическая часть программы

```
END;
```

Рис. 5.5. Структура цикла с использованием оператора *WHILE*

REPEAT

Циклическая часть программы

UNTIL <логическое выражение> ,

Рис. 5.6. Структура цикла с использованием оператора REPEAT

Рис. 5.7. Структура программы с использованием оператора выбора CASE

```

CASE N OF
  1: WRITELN ('A');
  2: WRITELN ('B');
  3: WRITELN ('C');
END;

```

Оператор перехода GOTO служит для обхода участка программы. Оператор записывается в следующем виде:

GOTO m;

где m — метка оператора, на который передается управление. Метка должна быть объявлена в разделе меток. Например,

LABEL 3;

3: Y := C + X;

GOTO 3;

Процедура представляет собой определенную последовательность описаний и операторов, которая может быть вызвана одним оператором процедуры. В языке Паскаль имеются четыре встроенные процедуры, которые используются в программах для ввода и вывода данных. Они могут быть вызваны с помощью следующих операторов процедуры:

READ (A1, A2, A3, ..., AN) — обеспечивает чтение данных из стандартного файла с именем INPUT и присвоение прочитанных значений соответствующим переменным A1, A2, A3, ..., AN.

READLN (A1, A2, A3, ..., AN) — выполняется так же, как и процедура READ, за исключением того, что по окончании чтения последней переменной осуществляется переход к началу новой строки стандартного файла INPUT.

WRITE (A1, A2, A3, ..., AN) — реализует вывод значений переменных A1, A2, A3, ..., AN в стандартный файл OUTPUT в одну строку.

WRITLN (A1, A2, A3, ..., AN) — реализует вывод значений переменных A1, A2, A3, ..., AN в стандартный файл OUTPUT в одну строку и переход к началу следующей строки файла OUTPUT.

CASE 1 OF

1 BEGIN

Операторная часть

END,

2 BEGIN

Операторная часть

END,

J BEGIN

Операторная часть

END,

Кроме того, в языке Паскаль предусмотрена возможность использования процедур, определяемых пользователем.

5.4. ЯЗЫКИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

На начальных этапах создания и внедрения МПСУ специальным технологическим оборудованием разработка прикладного программного обеспечения производилась либо в машинных кодах, либо на языке ассемблера. Программирование такого рода требует не только свободного владения логико-математическими приемами мультипрограммирования, обработки прерываний, описания связи с нестандартными внешними устройствами, но и глубокого знания архитектуры и систем команд используемой микроЭВМ и технических средств управления.

В условиях массовой автоматизации промышленных установок далеко не всегда представляется возможным обеспечить участие программистов в разработке каждой новой установки. И в то же время, привлечение программистов, не знакомых с особенностями конкретной технологии, оборудования, средств управления, затрудняет эффективное использование новых управляющих средств. Кроме того, пользователь вынужден оперативно корректировать или модифицировать свою программу, что всегда необходимо при разработке и отладке новой технологии.

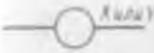
Таким образом, широкое применение микропроцессорных технических средств управления требует, чтобы большинство специалистов, как разработчиков, так и технологов, овладело приемами программирования задач управления СТО, а для этого необходимы доступные и относительно простые средства (языки) описания программ управления. При создании языков, ориентированных на описание задач управления, разработчик сталкивается с многообразными и зачастую противоречивыми и неадекватными требованиями пользователей. Одним из первых шагов при разработке языков управления является выбор степени проблемной ориентации языка.

Проблемно-ориентированный язык пользователя должен позволять описать алгоритм функционирования оборудования (язык описания), запрограммировать этот алгоритм на конкретных микропроцессорных технических средствах (базовый язык) и реализовать алгоритм на языке микроЭВМ (машинный язык).

Система управления технологическим оборудованием должна обеспечивать выполнение двух основных функций: управление циклом и параметрами. Остальные функции, рассмотренные в гл. 1, являются в определенной степени или производными от этих двух, или подготавливающими их выполнение.

В отечественной и мировой практике разработаны и продолжают разрабатываться языки пользователей. Среди языков описаний

Таблица 5.3. Компоненты релейных схем

Обозначение	Значения
	Логические компоненты: реле с замыкающим контактом реле с размыкающим контактом
	начало вствления параллельной цепи
	конец вствления параллельной цепи
Таймеры и счетчики	
	Символ присвоения
	Присвоение результата промежуточной переменной или выходы

алгоритмов управления наиболее широкое распространение получили языки релейно-контактных символов и булевых уравнений. Относительно простым, но достаточно эффективным является язык, основанный на принципе временных интервалов: «время — команда», «время — параметр».

Программное обеспечение системы управления оборудованием, написанное на языке высокого уровня и оформленное в виде отдельных программных модулей, из которых komponуется общая программа, имеет естественный язык пользователя, который позволяет в диалоговом режиме через функцию «меню» изменять настройку программы управления в достаточно узких пределах, например значения параметров, временные задержки, допусковый контроль и т. п.

Язык релейно-контактных символов. Опыт работы с релейно-контактными схемами управления привел к созданию соответствующего языка. Релейные схемы состоят в основном из шести компонентов (табл. 5.3): логических, таймеров и счетчиков, символов присвоения результатов.

Цепь — это соединение элементов, в том числе хотя бы одного символа присвоения релейных схем, представляющих собой последовательность команд, выполняемых программируемыми контроллерами (ПК). Таким образом, цепь — это элемент программирования релейных языков и, как это будет показано ниже, элемент булевых языков. Формат цепи может быть фиксированным или переменным. В первом случае цепь должна состоять из определенного числа компонентов. Символ присваивания позволяет идентифицировать строку программы и назначать промежуточную переменную или соответствующий выход. Логические компоненты придаются входам, промежуточным переменным или выходам.

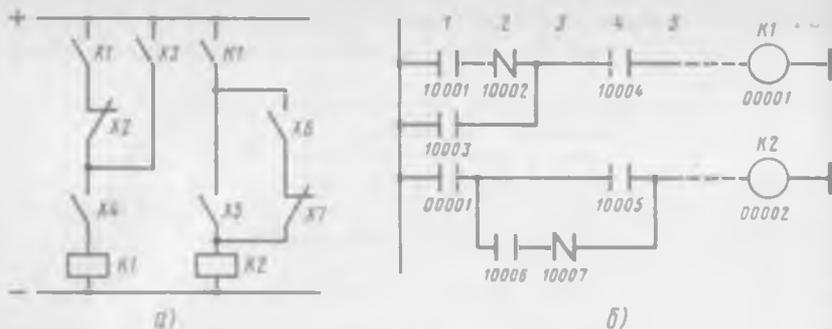


Рис 5.8. Релейная схема:

а — электрическая принципиальная схема; б — изображение релейной схемы на экране дисплея

При использовании языка релейно-контактных схем программа вычерчивает на экране дисплея в определенном масштабе легко читаемые схемы. Выполнение программы производится по цепям. Каждая цепь отрабатывается слева направо. Это дает возможность программисту сделать какой-то определенный сигнал приоритетным по сравнению с другими, например для обеспечения безопасности. Формат цепи программируемых контроллеров содержит разное число логических компонентов. Для компенсации ограниченного числа компонентов в цепи предусматривается возможность слияния цепей.

На рис. 5.8 приведен пример релейной схемы управления и ее эквивалентное изображение. Входные сигналы обозначаются через X , а выходные — Y .

В ПК фирмы «Модикон» приняты следующие обозначения:

0 XXXX — выходы или символ присвоения;

1 XXXX — входы;

3 XXXX — входные регистры;

4 XXXX — запоминающие и выходные регистры.

Формат цепи ПК «Модикон» предполагает наличие пяти компонентов: четыре первые позиции отводятся для логических компонентов, а последняя — для символа присвоения, указывающего с помощью номера цепь, промежуточную (рабочую память) и выходную переменную в соответствии с логикой управления. В примере, приведенном на рис. 5.8, промежуточная переменная $Y1$ (00001) обуславливает состояние 1 выхода $Y2$ (00002). Комплексная программа, состоящая из сети цепей, может быть распечатана на алфавитно-цифровом печатающем устройстве. В конце распечатки после релейно-контактных цепей распечатывается список поперечных ссылок всех входов и выходов по цепям, где они запрограммированы.

Большинство ПК имеют функции выдержки времени и счета. Различают два вида реле времени (таймеров). Они содержат

Таблица 5.4. Основные булевые операторы

Булевый оператор	И (конъюнкция)	ИЛИ (дизъюнкция)	НЕ (инверсия)
Математическая символика	\wedge	\vee	$\bar{a}, /a$
Релейная символика			

уставку (проселектор) и накопитель значений (аккумулятор). При совпадении этих двух значений формируется и выдается сигнал.

Таймеры первого вида начинают счет при подаче управляющего воздействия и обнуляются при его снятии. Накапливающие таймеры при снятии управляющего воздействия останавливают счет и продолжают его при новом воздействии. Счетчики, применяемые в ПК, работают в двух режимах – суммирования и вычитания. В режиме суммирования при переходе управляющего воздействия из состояния «0» в «1» в аккумулятор добавляется 1, в другом режиме 1 отнимается. Установка значений аккумуляторов в «исходное» осуществляется отдельным воздействием.

Язык булевых уравнений. Алгоритм управления циклом оборудования может быть представлен в виде системы булевых уравнений. В табл. 5.4 представлены основные булевые операторы.

Уравнения, описывающие схему, приведенную на рис. 5.8.а, имеют вид: $(X1 \cdot X2 + X3) X4 = Y1$; $(X6 \cdot X7 + X5) Y1 = Y2$. В данном случае имеем дело с цепью, состоящей из булевых операторов. Символ присвоения эквивалентен знаку равенства.

Для того чтобы запрограммировать контроллер под конкретную задачу управления, одного лишь языка релейно-контактных символов или булевых уравнений недостаточно. Необходимо выполнить целый ряд функций программирования, таких как идентификация, инициализация, управление циклом, реализация вычислений, отображение информации и т. п. Эти функции выполняются с помощью базового языка, т. е. «словарного запаса» и «грамматики», которые позволяют на определенных технических средствах реализовать программу управления. Идентификаторы предназначены для обозначения элементов, к которым обращается программа для обеспечения соответствия логическим и физическим элементам. Команды инициализации можно интерпретировать как команды присваивания начальных значений.

В табл. 5.5 приведен состав базового программного обеспечения одного из отечественных программируемых контроллеров.

Современные ПК помимо функций циклового управления могут реализовать и функции регулирования по ПИД-закону. Если обозначить $\varepsilon(t)$ мгновенное значение разности между уставкой

Таблица 5.5. Состав базового программного обеспечения

Модуль	Функциональное назначение	Область использования
1	Интерпретатор управляющих директив	1,2
2	Блок топологического контроля релейной схемы	1
3	Блок перевода релейной схемы в булево вычисление	1
4	Блок генерации машинных кодов	1
5	Блок формирования диагностических запросов	1
6	Блок синтаксического контроля булевого выражения	1,2
7	Блок генерации булевого выражения из машинного эквивалента релейной цепи	2
8	Блок формирования признаков состояния элементов релейной цепи	2
9	Блок перевода булевого выражения в релейную схему	1,2
10	Блок формирования динамического состояния релейной цепи	2
11	Интерпретатор диагностических запросов	2
12	Блок вывода на печать технической документации и диагностических сообщений	1,2

Примечание: 1 — использование модуля на этапе создания системного программного обеспечения;
2 — использование модуля в эксплуатационном режиме

регулируемого параметра и его действительным значением, то выдаваемый ПИД-регулятором сигнал $U(t)$ можно описать уравнением

$$U(t) = k_1 \varepsilon(t) + k_2 \int_0^t \varepsilon(t) dt + k_3 \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + U_m,$$

где U_m — управляющий сигнал в условных режимах без воздействия возмущающих факторов; k_1 — коэффициент усиления пропорционального воздействия; k_2 — величина, обратная постоянной времени интегрирования; k_3 — постоянная времени дифференцирования.

Простым и доступным для разработчиков и работников служб эксплуатации языком является язык программаторов «время — команда» и «время — параметр». Несмотря на некоторую ограниченность функций, этот язык позволяет запрограммировать функционирование достаточно сложного оборудования типа диффузионного, вакуумно-напылительного, плазмохимического. На основе временных интервалов применительно к техническим средствам «Орион-3» для управления технологическим оборудованием была разработана программа управления.

Основной задачей ПО является последовательное выполнение технологических операций по заданному временному графику (циклограмме) с использованием заданного набора дискретных команд и аналоговых сигналов, соответствующих данному исполнению контроллера. Для выполнения этой задачи ПО реализует следующие функции:

программирование (ввод технологической программы, контроль введенных данных);

собственно управление;

индикацию хода выполнения технологических процессов.

Поскольку основным фактором управления в данной системе является время, весь технологический цикл разбивается на временные интервалы. Программа управления производит счет времени и последовательно выдерживает временные интервалы, обеспечивая исполнение заранее запрограммированных на этих интервалах управляющих воздействий. Кроме этого программа проводит анализ состояния процесса, по результатам которого может выполнить либо условный останов, либо условный переход на другой временной интервал.

Программа управления обладает следующими возможностями: число временных интервалов равно 100;

время интервала может меняться от 1 с до 9 ч 59 мин 59 с с дискретом 1 с;

на протяжении времени от запуска технологической программы до момента ее окончания может решаться «основное» уравнение, представляющее собой логическое уравнение, аргументами которого служат состояния дискретных входов. Уравнение решается каждую секунду и при нулевом результате происходит заранее запрограммированный останов или переход на заданный интервал, а также накопление диагностической информации;

по ходу выполнения технологической программы управления программа обеспечивает экстренное обслуживание инициативных сигналов, которое заключается в процедуре включения — выключения заданного набора дискретных выходов.

На каждом временном интервале программа управления может выполнять следующие действия:

включать в начале интервала заданный набор дискретных выходов и поддерживать их до окончания интервала, ежесекундно подтверждая их состояние;

включать в начале интервала заданный набор дискретных команд с контролем и по отрицательному результату контроля производить заранее запрограммированный останов или переход на запрограммированный интервал, а также накопление диагностической информации. Под дискретной командой с контролем понимается дискретный выход и однозначно соответствующий ему дискретный вход. По истечении заранее запрограммированного времени после включения выхода программа проверяет дискретный вход. Нулевое состояние входа дает отрицательный результат контроля;

включать в начале интервала заданный набор аналоговых выходов. Включение каждого выхода можно произвести скачком, ежесекундно подтверждая его состояние, или плавно, по линейному закону от уровня выхода на предыдущем интервале до уровня, заданного на данном интервале;

вести регулирование по ПИД-закону заданного числа контуров регулирования;

вести допусковый контроль заданного числа аналоговых входов и осуществлять заранее запрограммированный останов или переход на

заданный интервал, если значение аналогового сигнала на входе не попадает в значение допуска. Включение допускаемого контроля возможно через заранее запрограммированную задержку времени;

решать интегральное логическое уравнение, аргументами которого являются состояния дискретных входов. При нулевом решении уравнения производить заранее запрограммированный останов или переход на заданный интервал, накапливая при этом диагностическую информацию;

организовывать повторение любой интервальной последовательности необходимое число раз;

производить в конце интервала переход на любой временной интервал.

Большое значение при разработке ПО было уделено выбору языка общения с системой. Опыт показал, что лишь простые наглядные средства обеспечивают быструю безболезненную адаптацию потребителей к автоматическому оборудованию. Поэтому в качестве языка программирования технологического процесса был выбран язык диалогового общения с использованием «меню», обеспечивающий наибольшую простоту и удобство. Не требуя от обслуживающего персонала высокой квалификации, этот язык представляет «подсказку» возможного действия, облегчая технологическое программирование.

Система иерархически вложенных указателей («меню») дает возможность путем последовательного выбора указателей выйти на нужный режим работы (рис. 5.9).

Для описания режимов управления технологическими процессами низкой и средней сложности, управляющим устройством которых является комплекс УТК-5, был создан проблемно-ориентированный язык КАУТ-80 (Контроль, Анализ, Управление Технологией, год реализации-1980).

Простота и доступность входного языка для пользователя обеспечивается следующими свойствами:

КАУТ-80 имеет модульную структуру. Каждой технологической операции, проводимой на объекте управления в реальном времени, ставится в соответствие программный модуль — «работа» КАУТ-программы;

«работы» описываются и отлаживаются относительно независимо, связь между ними осуществляется через массив глобальных переменных. Специальных операторов «эквивалентирования» параметров в языке нет, общие для нескольких работ переменные должны иметь одинаковые имена;

описание конфигурации объекта управления сведено к простому поименованию каналов связи технологического объекта с управляющим комплексом (УК). Тип аппаратуры и номера каналов перебираются и предлагаются пользователю автоматически за счет встраивания в компилятор архитектуры УК;

Рис. 5.9. Циклограмма режима «Программирование»

в языке существуют три типа переменных, необходимых и достаточных для управления вакуумно-технологическими процессами: «целые», «вольты», «время»;

нет средств описания аппаратуры. Встраивание типовых для конкретного УК интерфейсных программ (драйверов) в операционную систему позволяет пользователю осуществлять взаимодействие УК с объектом специализированными операторами системного обмена;

сложный для непрофессионалов аппарат прерываний заменен встроенными в систему средствами опроса датчиков, установленных на технологическом оборудовании.

Ориентация на характеристики вакуумно-технологических процессов, оборудования и средства управления позволили создать простые и однозначные термины языка, число которых не превышает 20.

Полный технологический процесс описывается КАУТ-программой, которая состоит из заголовка и «тела». В заголовке идентифицируются и распределяются каналы связи между технологическим объектом и управляющей микроЭВМ, а также описываются параметры технологического процесса. Назначаются каналы КОНТРОЛИРУЕМЫЕ, ВКЛЮЧАЕМЫЕ, РЕГУЛИРУЕМЫЕ; им присваиваются номера и наименования; проводится описание параметров с присвоением номера, имени, единицы измерения.

Заголовок КАУТ-программы → <распределение каналов> <описание параметров>

Стрелка заменяет слова «есть по определению» или «состоит из».

Распределение каналов → $\left[\begin{array}{l} \langle \text{контролируемые каналы} \rangle \\ \langle \text{каналы дискретного управления} \rangle \\ \langle \text{каналы аналогового управления} \rangle \end{array} \right]$

Квадратные скобки обозначают объединение множества, а вертикальная черта заменяет слово «либо».

Контролируемые каналы → **КОНТРОЛИРУЕМЫЕ:** { <номер канала> ; <имя контролируемого датчика> , } —

Фигурные скобки обозначают объединение множеств

Каналы дискретного управления → **ВКЛЮЧАЕМЫЕ:** { <номер канала> ; <имя включаемого элемента> , } —

Каналы аналогового управления → **РЕГУЛИРУЕМЫЕ:** { <номера канала> ; <имя регулируемого канала> , } —

Подчеркнутые элементы являются частью языка.

Описание параметров → <номер параметра> : <имя> , <единица измерения> , <знак> , <положение запятой> .

Номер параметра → П <целое> .

Имя → И <идентификатор> .

Таблица 5.6. Операторы и ограничители языка КАУТ-80

Ограничители		Операторы	
+		АППАРАТНОЕ	ПУД
-		БЛОКИРОВАТЬ	СТАРТ
(ВКЛ	УПР
)	%	ЕСЛИ	ФИНАЛ
>	\$	ЖДАТЬ	ХОД
<		ИЗМ	ЦИФРА
		КОНЕЦ	ЧИТ
⇒	[]	НА	ЭКРАН
		ОТКЛ	

Единица измерения → <буква> [<буква>]

Знак → + | -
- | -

Положение запятой → 0 | 1 | 2 | 3

Цифра 0 говорит о том, что в значении параметра, вызванного на экран комплекса УТК-5, запятая будет стоять после третьей цифры; 1 — запятая после второй цифры; 2 — после первой; 3 — перед первой. В заголовок КАУТ-программы выносятся только те параметры, которые требуется менять или контролировать в ходе управления технологическим процессом.

Тело КАУТ-программы состоит из описаний работ.

Тело КАУТ-программы → <работа> { <работа> }.

При описании работ используются специальные операторы и ограничители — специальные символы, пары символов или зарезервированные слова, которые приведены в табл. 5.6.

Зарезервированные слова, обозначающие операторы, начинаются с апострофа, чтобы отличить их от идентификатора. Группа символов называется оператором присвоения и произносится «присвоить». После выполнения присвоения переменная принимает значение, полученное в результате вычисления (или присвоения).

«Работа» состоит из заголовка и тела работы. В заголовке указывается номер работы. Завершает тело работы разделительный оператор КОНЕЦ.

РАБОТА → <ЗАГОЛОВЕК РАБОТЫ> <ТЕЛО РАБОТЫ>

ЗАГОЛОВЕК РАБОТЫ → <РАБОТА> <НОМЕР РАБОТЫ>

НОМЕР РАБОТЫ → <ЦЕЛОЕ>

ТЕЛО РАБОТЫ → <НУМЕРОВАННЫЙ ОПЕРАТОР>

{ <НУМЕРОВАННЫЙ ОПЕРАТОР> } КОНЕЦ;

В гл. 6 приведен пример КАУТ-программ технологического процесса.

Разнообразие функций управления, создание и развитие различных языков пользователей затрудняет выбор типа языка. Нужно принимать во внимание не только технические факторы (жесткость или гибкость управления, возможность расширения и модернизации), но и социальные моменты, такие как наличие квалифицированных кадров программистов, эксплуатационников, сложность внедрения новой техники и др.

Глава 6. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ

6.1. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ

Рассмотрим конечно-разностное уравнение, представляющее собой рекуррентный ПИД-алгоритм регулирования:

$$U = CO \cdot E + C1 \cdot SUM + C2 \cdot (E - E1). \quad (6.1)$$

Здесь $CO = KU$; $C1 = KU \cdot TO / TI$; $C2 = KU \cdot TD / TO$.

$$SUM = \sum_{i=1}^k E_{i-1}$$

где KU — коэффициент усиления системы; TO — период квантования; TI — постоянная интегрирования; TD — постоянная дифференцирования; E — дискретное значение сигнала ошибки на текущем такте; $E1$ — дискретное значение сигнала ошибки на предыдущем такте; E_{i-1} — дискретное значение сигнала ошибки на $(i-1)$ -м такте; U — дискретное значение сигнала управления на текущем такте.

При программной реализации алгоритма (6.1) необходимо учитывать следующие особенности:

при вычислении U на первом шаге задавать начальные значения переменных SUM и $E1$ соответственно;

порядок вычисления U на первом и последующих шагах несколько различен;

поскольку KU , TO , TI и TD — постоянные параметры, то коэффициенты CO , $C1$ и $C2$ следует определять до процедуры вычисления U .

Вычисление по формуле (6.1) значения сигнала управления может быть реализовано на языке Паскаль в виде процедуры с именем ПИД (рис. 6.1).

Конечно-разностное уравнение, представляющее рекуррентный ПИД-алгоритм регулирования, имеет следующий вид:

$$U = U1 - CO \cdot E + C1 \cdot E1 + C2 \cdot E2, \quad (6.2)$$

где $CO = KU \cdot (1 + TD / TO)$; $C1 = KU \cdot (1 + 2TD / TO - TO / TI)$; $C2 = KU \cdot TD / TO$; $E2$ — дискретное значение сигнала ошибки с задержкой на два такта относительно текущего; $U1$ — дискретное значение сигнала управления, вычисленное на предыдущем такте.

```

/* РАЗДЕЛ ГЛОБАЛЬНЫХ ОПИСАНИЙ
-----*/
VAR
  N: INTEGER; /* ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ */
  E: REAL; /* ТЕКУЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИГНАЛА ОШИБКИ */
  E1: REAL; /* ЗНАЧЕНИЕ СИГНАЛА ОШИБКИ НА ТАКТ НАЗАД */
  E2: REAL; /* ЗНАЧЕНИЕ СИГНАЛА ОШИБКИ НА 2 ТАКТА НАЗАД */
  U: REAL; /* УПРАВЛЯЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ */
  U1: REAL; /* ПРЕДЫДУЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ УПР. ВОЗД-Я */
  C0, C1, C2: REAL; /* КОЭФФИЦИЕНТЫ */

/* РАЗДЕЛ ПРОЦЕДУРЫ ПИД1
-----*/
PROCEDURE ПИД1;
BEGIN
  IF M = 1 THEN
    BEGIN
      E2 := E;
      U := (-C0)*E;
      M := 2
    END
  ELSE IF M = 2 THEN
    BEGIN
      E1 := E;
      U := U1 - C0*E1 + C1*E2;
      M := 0
    END
  ELSE
    BEGIN
      U := U1 - C0*E + C1*E1 + C2*E2;
      E2 := E1;
      E1 := E;
    END;
END;

/* РАЗДЕЛ ГЛАВНОЙ ПРОЦЕДУРЫ
-----*/
BEGIN
  M := 1;
  READ (C0, C1, C2); /* ВВОД ЗНАЧЕНИЙ C0, C1, C2 */
  ВВОД (E); /* ПРОЦЕДУРА ВВОДА "E" */
  ПИД1; /* ВЫЗОВ ПРОЦЕДУРЫ ПИД1 */
  ВЫВОД (U); /* ПРОЦЕДУРА ВЫВОДА "U" */
END;

```

Рис. 6.1. Структура программы, включающей процедуру ПИД

На рис. 6.2 показан пример реализации алгоритма (6.2), в виде процедуры ПИД1 на языке Паскаль.

6.2. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА

В § 4.3 была рассмотрена типичная задача управления последовательностью технологического цикла — управление процессом загрузки — выгрузки лодочки с подложками в реактор. Были также получены структурные формулы, определяющие алгоритм функционирования управляющего логического устройства.

```

/* РАЗДЕЛ ГЛОБАЛЬНЫХ ОПИСАНИЙ
-----*/
VAR
M: INTEGER           /* ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ           */
CO, C1, C2: REAL;   /* КОЭФФИЦИЕНТЫ           */
E : REAL;           /* ТЕКУЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИГНАЛА ОШИБКИ */
E1: REAL;          /* ПРЕДЫДУЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИГНАЛА ОШИБКИ */
U : REAL;           /* УПРАВЛЯЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ */
SUM : REAL;         /* НАКАПЛИВАЕМОЕ ЗНАЧЕНИЕ           */
TO, TI, TD, KU: REAL; /* ПАРАМЕТРЫ                 */

/* РАЗДЕЛ ПРОЦЕДУРЫ ПИД
-----*/
PROCEDURE ПИД;
BEGIN
  IF M = 1 THEN
    BEGIN
      E1:= E;
      SUM:= E;
      U:= CO*E + C1*SUM;
      M:= 0
    END
  ELSE
    BEGIN
      SUM:=SUM +E;
      U:= CO*E + C1*SUM + C2*(E-E1);
      E1:=E
    END
  END;
END;

/* РАЗДЕЛ ГЛАВНОЙ ПРОЦЕДУРЫ
-----*/
BEGIN
M:= 1;
READ(KU, TO, TI, TD); /* ВВОД ЗНАЧЕНИЙ KU, TO, TI, TD */
CO:= KU;
C1:= TO/TI;
C2:= TD/TO;
ВВОД(E);              /* ПРОЦЕДУРА ВВОДА "E"           */
ПИД;                  /* ВЫЗОВ ПРОЦЕДУРЫ ПИД           */
ВЫВОД(U);             /* ПРОЦЕДУРА ВЫВОДА "U"         */

END;

```

Рис. 6.2. Структура программы, включающей процедуру ПИД1

Целью настоящего параграфа является программная реализация алгоритма управления процессом загрузки—выгрузки на алгоритмическом языке Паскаль.

Сделаем предварительные замечания. При поверхностном знакомстве с данной задачей способ ее решения кажется очевидным. Ведь уже получены логические выражения, определяющие значения дискретных выходных сигналов $K1...K10$ в зависимости от значений дискретных входных ($D1...D10$) и управляющих (Ост, Вг, Зг) сигналов. Остается только программным путем вычислять значения сигналов $K1...K10$, используя полученные формулы, формировать эти сигналы и подавать их на исполнительные устройства объекта управления. Однако такой способ решения

задачи обладает целым рядом недостатков. Во-первых, время вычисления логических выражений на микроЭВМ будет значительно превышать время отклика логического устройства, построенного на основе полученных структурных выражений. Во-вторых, при работе с логическими выражениями нерационально используется оперативная память микроЭВМ. Ведь для хранения одного бита потребуется целая ячейка ОЗУ и т. п.

С точки зрения устранения отмеченных недостатков при программной реализации алгоритма управления рационально использовать не логические выражения, а таблицу истинности 4.8. Заметим, что входные сигналы (Ост, Вг, Зг, D1, ..., D10) кодируются 13-разрядным двоичным кодом, а выходные ($K_1...K_{10}$) — 10-разрядным двоичным кодом, т. е. длина кода в обоих случаях не превышает длины слова 16-разрядного МП. Следовательно, каждую комбинацию входных или выходных сигналов можно принимать или передавать микроЭВМ в виде всего лишь одного слова, а выбор выходного слова рационально осуществлять на основе таблицы истинности по заданному входному слову и номеру строки таблицы (взаимно соответствующие слова расположены на одной и той же строке с номером 1).

При реализации подобного способа вычисления управляющих выходных сигналов необходимо каждый раз устанавливать с помощью таблицы истинности соответствие между значениями входных и выходных сигналов. Однако при этом совсем необязательно хранить таблицу истинности в форме табл. 4.8. Коды входных и выходных сигналов, между которыми установлено соответствие, могут входить в различные наборы данных, но с одним и тем же порядковым номером. Например, в рассматриваемой задаче можно выделить три группы сигналов: Ост, Вг, Зг, управляющие выбором режима (табл. 6.1); входные информационные сигналы с датчиков (коды состояний), отражающие состояние технологического процесса (табл. 6.2), и выходные сигналы, управляющие технологическим процессом (табл. 6.3).

Наборы данных, как правило, оформляются в виде внешних файлов и хранятся на гибком магнитном диске. При необходимости эти файлы считываются в оперативную память и соответствующим образом обрабатываются.

Рассмотрим структурную схему алгоритма управления процессом загрузки — выгрузки (рис. 6.3).

Вначале осуществляется ввод кода состояния (СОСТ). Двоичный код состояния сравнивается с кодом исходного состояния (ИС), значение которого представлено в первой строке табл. 6.2. Если значение СОСТ не совпадает со значением ИС, то выдается диагностическое сообщение. В случае совпадения кодов вводится код управления режимом работы (РЕЖИМ), который сравнивается с фиксированным значением K_2 (кода режима выгрузки), представленного в строке 2 табл. 6.1. Если значение K_2 не равно

Таблица 6.1. Сигналы выбора режима

Код	Ост	Вг	Зг	Режим работы
0	0	0	0	Останов
1	0	0	1	Загрузка
2	0	1	0	Выгрузка
3	0	1	1	Останов
4	1	0	0	»
5	1	0	1	»
6	1	1	0	»
7	1	1	1	»

значению РЕЖИМ, то формируется выходной код (УКОД), равный коду останова (КОст) и его значение выдается на устройство вывода, связанное с исполнительным устройством. Значение кода останова хранится в последней строке табл. 6.3. В

Таблица 6.2. Коды состояний

<i>l</i>	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	Десятичный код
1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	362
2	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	618
3	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	682
4	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	666
5	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	662
6	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	661
7	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	665
8	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	681
9	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	617
10	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	361
11	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	617
12	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	681
13	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	665
14	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	661
15	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	662
16	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	666
17	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	682
18	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	618
19	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	362

Таблица 6.3. Управляющие коды

<i>l</i>	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}	Десятичный код
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	512
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	128
3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	16
4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	8
7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	32
8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	64
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	256
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	512
11	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	128
12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	16
13	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
15	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	8
16	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	32
17	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	64
18	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	256
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

случае совпадения кодов РЕЖИМ и K_2 выходной код УКОД принимает значение текущего управляющего кода (значение строки l табл. 6.3) и это значение выводится на исполнительное устройство. Далее значение параметра l увеличивается на 1 и вводится код состояния, характеризующий состояние объекта управления в данный момент. Текущее значение кода состояния сравнивается со значением кода ТАБЛ2[l] (строка l табл. 6.2). Если значение СОСТ не совпадает с ТАБЛ2[l], то снова вводится текущее значение СОСТ и цикл повторяется. В случае совпадения кодов СОСТ и ТАБЛ2[l] значение СОСТ сравнивается с фиксированным значением КНЗ (кодом начала загрузки), значение которого представлено на строке 10 табл. 6.2. В случае неравенства указанных кодов осуществляется повторение цикла операций, начиная с ввода кода управления режимом работы. В случае равенства кодов, что свидетельствует об окончании режима выгрузки и о начале режима загрузки, осуществляется переход к другому блоку структурной схемы — вводу кода управления режимом. С ввода кода управления режимом начинается новый цикл операций, соответствующий режиму загрузки. Код режима загрузки K_1 представлен в строке 1 табл. 6.1.

Цикл операций, соответствующий режиму загрузки, аналогичен уже рассмотренному циклу структурной схемы. В конце этого цикла текущее значение кода СОСТ сравнивается с фиксированным значением ИС, которое представлено в последней строке

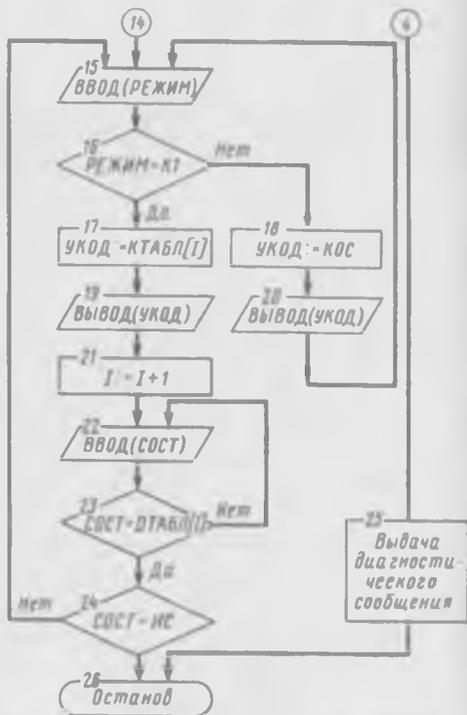
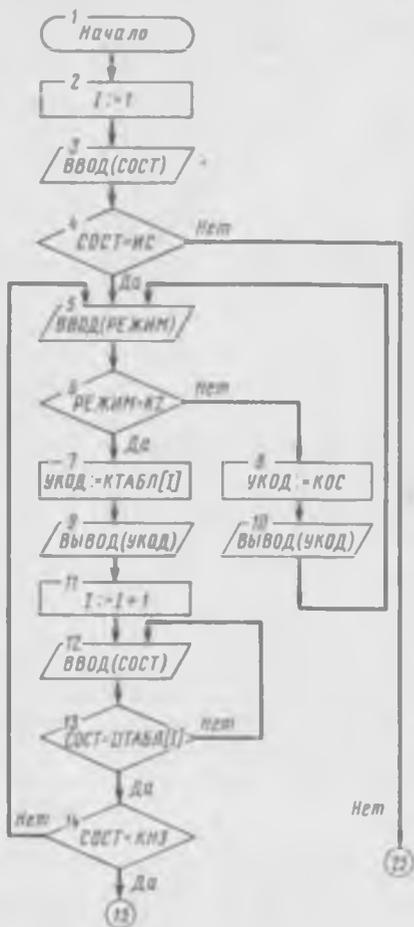


Рис. 6.3. Структурная схема алгоритма управления состоянием технологического цикла

табл. 6.2. В случае неравенства кодов цикл операций, соответствующий режиму загрузки, повторяется. Если значения кодов СОСТ и ИС совпадают, цикл управления заканчивается.

Программа управления процессом загрузки — выгрузки, оформленная в виде процедуры, представлена на рис. 6.4, 6.5.

6.3. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Кроме задач управления параметрами и состоянием технологического цикла в микроэлектронике существует целый ряд специальных задач обработки информации, например задача определе-

```

/*-----
!   ВЫЧИСЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ   !
!   СОСТОЯНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА       !
!-----*/
PROCEDURE ЛОГИКА ;
  LABEL 5,10,13,18;
  CONST
    K1 = 1;          /* КОД РЕЖИМА ЗАГРУЗКИ          */
    K2 = 2;          /* КОД РЕЖИМА ВЫГРУЗКИ         */
    КМЗ=361;         /* КОД СОСТОЯНИЯ В НАЧАЛЕ ЗАГРУЗКИ */
    КОС=0;           /* ВЫХОДНОЙ КОД В РЕЖИМЕ "ОСТАНОВ" */
    КИС=362;         /* КОД ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ      */
  VAR
    СОСТ:INTEGER;   /* КОД СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГ-ГО ЦИКЛА */
    РЕЖИМ:INTEGER;  /* КОД ВЫБОРА РЕЖИМА            */
    I:INTEGER;      /* ПАРАМЕТР ЦИКЛА              */
  BEGIN
    ТАБЛИЦА;        /* ВЫЗОВ ПРОЦЕДУРЫ "ТАБЛИЦА"    */
    I:=1;
    ВВОД(СОСТ);     /* ПРОЦЕДУРА ВВОДА "СОСТ"      */
    IF СОСТ <> КИС
      THEN ВЫВОД(' НЕТ ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ ');
    5: ВВОД( РЕЖИМ ); /* ПОЧЕДУРА ВВОДА "РЕЖИМ"     */
      IF РЕЖИМ <> K2 THEN
        BEGIN
          ВЫВОД( КОС );
          GOTO 5
        END;
      ВЫВОД( ТАБЛ2[I] );
      I:=I + 1;
    10: ВВОД( СОСТ );
      IF СОСТ <> ТАБЛ1[I] THEN GOTO 10;
      IF СОСТ <> КМЗ THEN GOTO 5;
    13: ВВОД( РЕЖИМ );
      IF РЕЖИМ <> THEN
        BEGIN
          ВЫВОД( КОС );
          GOTO 13
        END;
      ВЫВОД( ТАБЛ2[I] ); /* ПРОЦЕДУРА ВЫВОДА          */
      I:=I + 1;
    18: ВВОД( СОСТ );
      IF СОСТ <> ТАБЛ1[I] THEN GOTO 18
  END;

```

Рис. 6.4. Процедура вычисления значений сигналов управления состоянием технологического цикла

ния времени окончания процесса травления, которая сводится к задаче нахождения максимального значения функции, обладающей свойством унимодальности. При этом значения функции, характеризующей процесс травления, поступают с устройства ввода информации в реальном масштабе времени. В момент достижения максимального значения на внешнее устройство выдается сигнал об окончании процесса травления. Процедура определения времени окончания процесса травления представлена на рис. 6.6.

```

PROCEDURE ТАБЛИЦА;
  VAR
    F1:TEXT;      /* ФАЙЛОВАЯ ПЕРЕМЕННАЯ */
    I:INTEGER;    /* ПАРАМЕТР ЦИКЛА */
  BEGIN
    RESET(F1,'T1'); /* ОТКРЫТИЕ ФАЙЛА ДЛЯ ЧТЕНИЯ */
    FOR I:= 1 TO N DO
      BEGIN
        READ( F1,ТАБЛ1[I] ); /* ЧТЕНИЕ ФАЙЛА */
        READ( F1,ТАБЛ2[I] ); /* ЧТЕНИЕ ФАЙЛА */
      END;
    CLOSE(F1); /* ЗАКРЫТИЕ ФАЙЛА ДЛЯ ЧТЕНИЯ */
  END;

```

Рис. 6.5. Процедура «Таблица»

```

/* РАЗДЕЛ ГЛОБАЛЬНЫХ ОПИСАНИЙ
-----*/
CONST СИГНАЛ =1;
VAR
  F0:REAL; /* ПРЕДЫДУЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИИ */
  F1:REAL; /* ТЕКУЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИИ */
/* РАЗДЕЛ ПРОЦЕДУРЫ КТРАВА
-----*/

PROCEDURE КТРАВА;
  LABEL 1;
  BEGIN
    F0:=0; /* НАЧАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИИ */
    1: ВВОД(F1); /* ПРОЦЕДУРА ВВОДА ЗНАЧЕНИЯ ФУНКЦИИ */
    IF F1 >= F0 THEN
      BEGIN
        F0:= F1;
      GOTO 1
      END;
    ВЫВОД(СИГНАЛ) /* ПРОЦЕДУРА ВЫВОДА СИГНАЛА */
  END;

```

Рис. 6.6. Процедура определения времени окончания процесса травления

6.4. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ НА ЯЗЫКАХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

В качестве примера описания алгоритма управления на языках пользователя рассмотрим работу устройства загрузки—выгрузки пластин из кассеты в кассету. На рис. 6.7 представлена структура устройства загрузки—выгрузки.

Пластины 3 из выдающей кассеты 1 по транспортеру 6 перемещаются к столику 4, где останавливаются поднятыми упорами 5. При подъеме и опускании столика происходит перегрузка пластин на руку загрузки 9а, которая пустая выходит из шлюзовой камеры 7 через двери 8 и возвращается в шлюз с пластиной, которую затем перемещает в позицию 11 рабочей камеры 10. Рука выгрузки 9б выходит из шлюза с пластиной, оставляет ее на столике и вновь уходит в шлюз. Пластина при опускании столика попадает на транспортер 6 и при опущенных упорах 5 перемещается в кассету выгрузки 2, после чего механизм кассеты перемещается вверх на один шаг.

Если представить алгоритм функционирования механизмов устройства загрузки в виде последовательной их работы во времени (рис. 6.8), то можно описать работу устройства с помощью программы «время—команда».

Составление программы пользователя начинается с присвоения имен всем командам на исполнительные механизмы и сигналам от датчиков, а также привязки их к конкретным выходным и входным цепям микропроцессорного устройства управления. Все материалы сводятся в таблицы, которые являются частью технического описания на установку. Применительно к

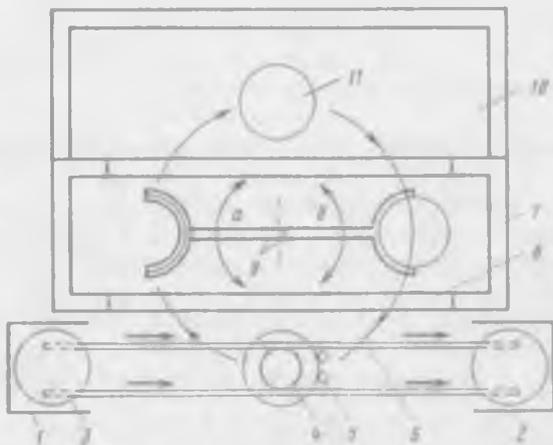


Рис. 6.7. Структура устройства загрузки, работающего по принципу «из кассеты в кассету» (в плане)

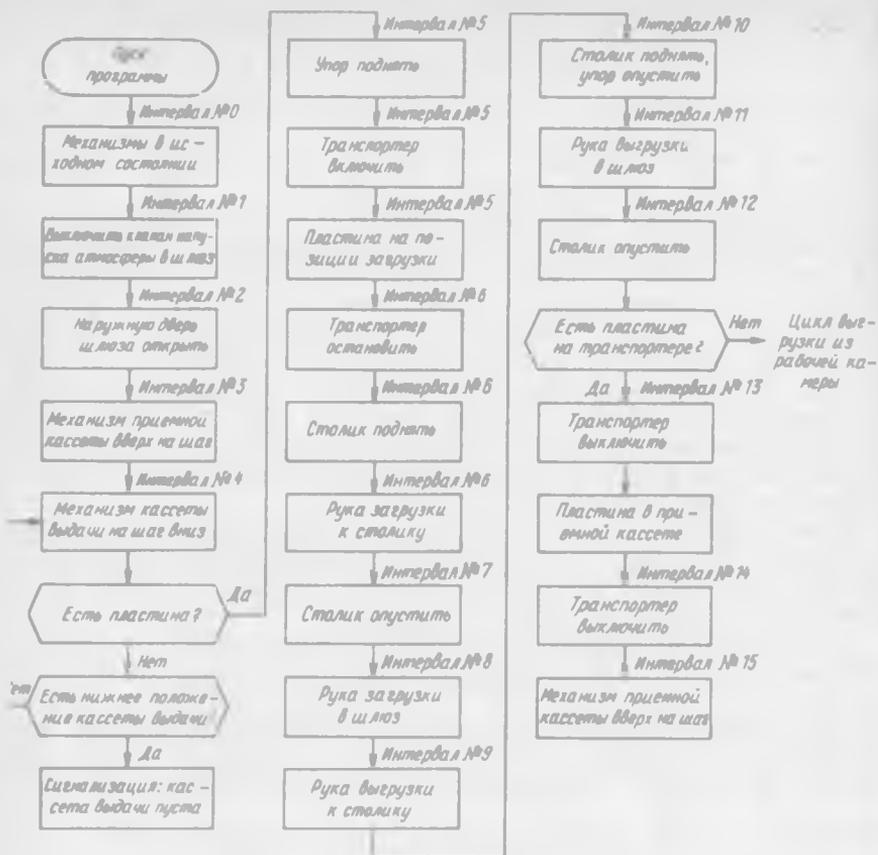


Рис. 6.8. Алгоритм загрузки и выгрузки пластин

рассматриваемому примеру в табл. 6.4 приведены сигналы датчиков (X), а в табл. 6.5 — команды управления (Y). Номера соединителей, контактов, уровни сигналов и коды адресов, регистров данных, состояний указываются в таблицах применительно к каждому конкретному использованию МПСУ.

Следующий шаг, выполняемый пользователем, заключается в программировании последовательности работы всех механизмов, распределении их функционирования по временным интервалам. С этой целью задаются номера интервалов и их длительность.

Интервал № 0. Все механизмы должны быть в исходном состоянии: рука загрузки и выгрузки в шлюзовой камере, двери шлюза закрыты, кассета выдачи — в верхнем положении, а приемная — в нижнем, транспортер остановлен, столик и упоры

Таблица 6.4. Характеристики дискретных входных сигналов

№ п/п	Полное наименование сигнала	Сокращенное наименование	Условное наименование	Логическое состояние	Модуль приема дискретных сигналов				
					Соединитель	Контакт	Уровень	Коды регистров адресов, данных, состояния	
1	Шаг механизма кассеты выдачи	СШМКВ	X1	1	Данные граф заполняются при конкретном проектировании системы управления				
2	Шаг механизма кассеты приема	СШМКП	X2	1					
3	Кассета выдачи в верхнем положении	СКВВ	X3	1					
4	Кассета выдачи в нижнем положении	СКВН	X4	1					
5	Кассета приема в верхнем положении	СКПВ	X5	1					
6	Кассета приема в нижнем положении	СКПН	X6	1					
7	Наличие пластины в кассете выдачи	СНПКВ	X7	1					
8	Наличие пластины в кассете приема	СНПКП	X8	1					
9	Столик в верхнем положении	ССТВП	X9	1					
10	Столик в нижнем положении	ССТНП	X10	1					
11	Упоры в верхнем положении	СУПВВ	X11	1					
12	Упоры в нижнем положении	СУПНП	X12	1					
13	Дверь шлюза (наружная) открыта	СДШО	X13	1					
14	Рука загрузки в шлюзовой камере	СРЗШК	X14	1					
15	Рука загрузки у столика	СРЗСТ	X15	1					
16	Рука выгрузки в шлюзовой камере	СРВШК	X16	1					
17	Рука выгрузки у столика	СРВСТ	X17	1					
18	Наличие пластины на транспортере на позиции загрузки	СНПТ	X18	1					

внизу. Эти условия записываются: $Y11=1$; $Y13=1$; $Y16=1$; $Y1=1$; $Y4=1$; $Y5=0$; $Y7=1$; $Y9=1$; $X14=1$; $X16=1$; $X13=0$; $X3=1$; $X6=1$; $X10=1$; $X12=1$.

Интервал № 1. Длительность интервала 2 с: $Y14=1$.

Интервал № 2. Длительность интервала 2 с: $Y15=1$.

Интервал № 3. Длительность интервала 2 с: $Y3=1$.

Интервал № 4. Длительность интервала 2 с: $Y2=1$.

Условие: $X7=1$ — переход на интервал № 5. Если нет сигнала

Таблица 6.5. Характеристики дискретных команд

№ п/п	Полное наименование команды	Сокращенное наименование	Условное наименование	Логическое состояние	Модуль выдачи дискретных команд				
					Соединитель	Контакт	Уровень сигнала	Коды адресов регистров данных, состояний	
1	Переместить кассету выдачи вверх	ККВВ	У1	1	Данные граф заполняются при конкретном проектировании системы управления				
2	Переместить кассету выдачи на шаг вниз	ККВН	У2						
3	Переместить кассету приема на шаг вверх	ККПВ	У3	1					
4	Переместить кассету приема вниз	ККПН	У4	1					
5	Включить транспортер	КВТ	У5	1					
6	Отключить транспортер	КОТ	У5	0					
7	Поднять столик	КПСТ	У6	1					
8	Опустить столик	КОСТ	У7	1					
9	Поднять упоры	КПУ	У8	1					
10	Опустить упоры	КОУ	У9	1					
11	Переместить руку загрузки к столику	КРЗСТ	У10	1					
12	Переместить руку загрузки в шлюз	КРЗШ	У11	1					
13	Переместить руку выгрузки к столику	КРВСТ	У12	1					
14	Переместить руку выгрузки в шлюз	КРВШ	У13	1					
15	Включить клапан напуска атмосферы в шлюз	КВКН	У14	1					
16	Открыть наружную дверь шлюза	КДШНО	У15	1					
17	Закрыть наружную дверь шлюза	КДШНЗ	У16	1					

X7 до конца интервала, то переход на интервал № 4, где $У2 = 1$ до момента появления X7.

Если X4-1, то появляется сигнализация, что кассета выдачи пуста. Дальнейшая работа механизмов по временным интервалам показана на рис. 6.8. При программировании разными пользователями разбиение на интервалы может существенно отличаться.

Если для описания работы механизмов устройства загрузки использовать язык релейно-контактных схем, то цепь управления транспортером (пассиками) может быть представлена в виде схемы, изображенной на рис. 6.9.

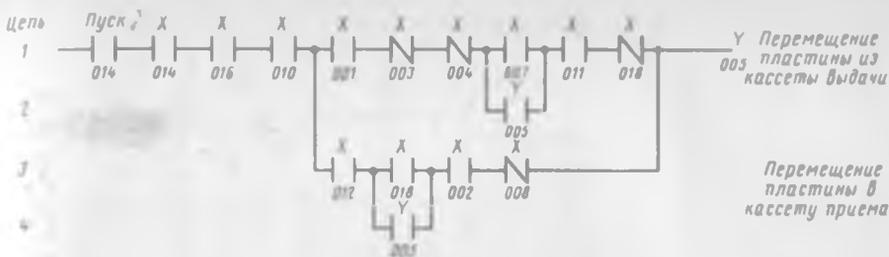


Рис. 6.9. Релейно-контактная схема управления транспортом устройства загрузки

При положениях рук загрузки и выгрузки в шлюзовой камере ($X14=1$ и $X16=1$), столика ($X10=1$) и ($X11=1$), шага механизма ($X1=1$), кассеты выдачи ($X3=0$) и ($X4=0$), наличии пластины в кассете выдачи ($X7=1$) и отсутствии ее на позиции столика ($X18=0$) и появлении команды «Пуск» выдается команда включения транспорта ($Y5=1$), которая блокирует в схеме управления сигнал наличия пластин в кассете выгрузки. Появление пластины на позиции столика сигналом $X18=1$ размыкает цепь выдачи команды включения транспорта $Y5$.

С использованием булевых выражений алгоритм управления схемы, представленной на рис. 6.9, может быть записан в виде уравнения: $\text{Пуск} \cdot X14 \cdot X16 \cdot X10 [X1 \cdot X3 \cdot X4 \cdot (X7 + Y5) \cdot X11 \cdot X18 + X12 \cdot X18 + X12 \cdot X8] = Y5$. Для простоты чтения его можно разделить на два: по цепи 1 и по цепи 3.

Специальный технологический язык КАУТ-80 в терминах оборудования и процесса позволяет производить программирование МПСУ разработчику и пользователю оборудования.

Полный технологический процесс описывается КАУТ-программой, которая состоит из заголовка и „тела“. В заголовке содержатся сведения о количестве и сложности обслуживаемых объектов, а также идентифицируются и распределяются каналы связи между технологическим объектом и управляющей микро-ЭВМ.

Рассмотрим пример КАУТ-программы, описывающий упрощенный технологический процесс. Требуется провести разогрев изделия в вакуумной камере. Объектом управления служит вакуумная камера с нагревательным элементом, снабженная необходимыми исполнительными элементами и датчиками (рис. 6.10).

Аналоговый исполнительный элемент:

Нагрев — регулирует режим нагревателя.

Дискретные исполнительные элементы:

Напуск — клапан, который подключает вентиль, создающий в вакуумной камере нормальное атмосферное давление. Подключается, когда требуется поднять колпак камеры;

Клапан — подключает к камере форвакуумный насос для создания низкого вакуума;

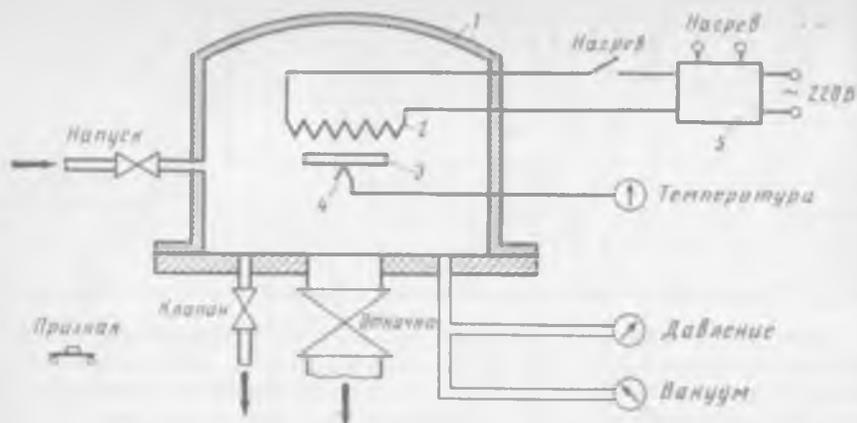


Рис. 6.10. Схема системы нагрева пластин в вакуумной установке:

1 — вакуумная камера; 2 — нагреватель; 3 — пластина; 4 — термомпара; 5 — устройство управления нагревом

Откачка — вентиль, подключает к камере насос, создающий высокий вакуум;
Нагрев — контакт, подключающий нагревательный элемент.

Дискретный датчик:

Признак — кнопка, нажатие которой служит признаком начала технологического процесса.

Аналоговые датчики:

Давление — измеряет низкий вакуум;

Вакуум — измеряет высокий вакуум;

Температура — измеряет температуру в камере.

До начала процесса вентиль **Напуск** открыт, вентили **Клапан** и **Откачка** закрыты, контакт **Нагрев** разомкнут, изделие помещено в камеру.

При нажатии кнопки **Признак** начинается технологический процесс. Вентиль **Напуск** перекрывается. **Клапан** открывается, и в камере создается начальный вакуум, значение которого показывает датчик **Давление**. При давлении низкого вакуума, соответствующем 7,1 В на датчике **Давление**, **Клапан** закрывается, подключается вентиль **Откачка** и создается высокий вакуум, соответствующий показателю датчика **Вакуум** 6 В. Условие достижения высокого вакуума служит сигналом для подключения нагревательного элемента: контакт **Нагрев** замыкается и начинается регулирование температуры.

Термообработка изделия проходит в режиме, когда изделие сначала нагревается до определенной температуры, выдерживается при этой температуре заданное время, затем нагревательный элемент отключается, и изделие остывает. На этом процесс обработки изделия заканчивается, вентиль **Откачка** закрывается, открывается клапан **Напуск**, и объект готов для повторения технологического процесса.

В табл. 6.6 приведен текст КАУТ-программы, описывающий рассмотренный технологический процесс. Относительные адреса операторов и подчеркнутые в тексте программы символы печатаются автоматически.

Таблица 6.6. Описание процесса на языке КАУТ-80

КАУТ-программа	Комментарий
<p><u>Контролируемые:</u> 1: К ПРИЗ, 2: К ДАВЛ, 3: К ВАКУУМ, 4: К ТЕМП—</p> <p><u>Включаемые:</u> 1: В КЛАПАН, 2: В ОТКАЧ, 3: В НАГРЕВ, 4: В НАПУСК</p> <p><u>Регулируемые:</u> 1: Р НАГРЕВ—</p> <p><u>Параметры:</u> 1: П Температура, U, +, 2 2: Счетчик</p> <p>РАБОТА 0 → КАМЕРА НАГРЕВА 0=0=УПР Р НАГРЕВ; 6 ОТКЛ В НАГРЕВ; 12 ОТКЛ В КЛАПАН; 16 ОТКЛ В ОТКАЧ; 22 ЖДАТЬ 1; 30 М1 'ЕСЛИ ЧИТ (К ПРИЗ)=0, ТО: ЖДАТЬ 0,5, НАЧАТЬ С М1; ИНАЧЕ 52 'ОТКЛ В НАПУСК; 56 ЖДАТЬ 1; 64 ВКЛ В КЛАПАН</p>	<p>ПРОГРАММА → <Заготовок КАУТ-ПРОГРАММЫ > <Тело КАУТ-ПРОГРАММЫ ></p> <p>Заготовок КАУТ-ПРОГРАММЫ с распределенным циклом и описанием параметров</p> <p>Тело КАУТ-ПРОГРАММЫ</p> <p>Устанавливается «0» в регулируемом устройстве Р НАГРЕВ</p> <p>Устанавливается в подложке ОТКЛ устройства НАГРЕВА ТЕЛЯ</p> <p>(НАГРЕВ), КЛАПАН и вентиль ОТКАЧНОЙ системы (ОТКАЧ)</p> <p>Задержка 1 с</p> <p>Цикл М1: если при опросе К ПРИЗ=0, то задержка 0,5 с и новый опрос. При К ПРИЗ=1 идем дальше</p> <p>Отключается НАПУСК</p> <p>Задержка 1 с</p> <p>Включается КЛАПАН предварительной ОТКАЧКИ КАМЕРЫ</p>

КАУТ-программа	Комментарии
70 М2: <u>ЖДАТЬ</u> 0,5;	Цикл М2: задержка 0,5 с
76 <u>ЕСЛИ</u> К ДАВЛ > U710, то:	Если показание прибора ДАВЛЕНИЕ > 7,1 В, то вернуться на М2
[на М2:] <u>ИНАЧЕ</u>	При показании прибора ДАВЛЕНИЕ < 7,1 В идем дальше.
112 <u>ОТКЛ</u> В КЛАПАН	Отключить клапан
116 <u>ВКЛ</u> В ОТКАЧ	Открыть вентиль для откачки до более глубокого вакуума.
122 М3: <u>ЕСЛИ</u> К ВАКУУМ > U600, то:	Цикл М3: если показания вакуумметра > 6,0 В, тогда выдается задержка на 5 с и идем дальше на М3
[<u>ЖДАТЬ</u> 5, <u>НАЧАТЬ</u> с М3:] <u>ИНАЧЕ</u>	При показании К ВАКУУМ < 6,0 В идем дальше.
142 U350 ⇒ <u>УПР</u> Р НАГРЕВ	Выставить на управляющем элементе Р НАГРЕВ 3,5 В
150 <u>ВКЛ</u> В НАГРЕВ	Включить контактор В НАГРЕВ
154 0 ⇒ П ТЕМПЕРАТУРА; -1	Параметру ТЕМПЕРАТУРА ЗАДАЕТСЯ ЗНАЧЕНИЕ ноль
162 <u>ЖДАТЬ</u> 25	Задержка 25 с
174 М4: П ТЕМПЕРАТУРА + U10 ⇒ П ТЕМПЕРАТУРА	Цикл М4: значение параметра П ТЕМПЕРАТУРА увеличивается на 0,1 В
204 П ТЕМПЕРАТУРА - К ТЕМП * 4 / 10 + Р НАГРЕВ ⇒ <u>УПР</u> Р НАГРЕВ	Из значения П ТЕМПЕРАТУРА вычитается показание с датчика К ТЕМП, результат умножается на 0,4 и прибавляется к значению Р НАГРЕВ (там было установлено 3,5 В). Полученный результат выставить на регулирующем устройстве Р НАГРЕВ.
230 <u>ЕСЛИ</u> К ТЕМП < U820, то: [<u>ЖДАТЬ</u> 15, начать с М4:] <u>ИНАЧЕ</u>	Если показание датчика температуры К ТЕМП меньше 8,2 В, то ввести задержку на 15 с и начать с М4.
254 0 ⇒ П СЧЕТЧИК; -2	Если показание больше 8,2 В, то идем дальше. Обнулить СЧЕТЧИК.

Окончание табл. 6.6.

КАУТ-программа	Комментарии
262 М5: U860 - К ТЕМП * 4 / 10 + Р НАГРЕВ = ⇒ <u>УПР</u> Р НАГРЕВ;	Цикл М5: из напряжения 8,6 В вычесть показание датчика К ТЕМП, результат умножить на 0,4 и сложить с Р НАГРЕВ и выставить это значение на Р НАГРЕВ.
306 П СЧЕТЧИК + 1 ⇒ П СЧЕТЧИК;	Содержание счетчика увеличивается на 1 единицу.
316 <u>ЕСЛИ</u> П СЧЕТЧИК < 80, то: [<u>ЖДАТЬ</u> 15, начать с М5:]	Если содержание счетчика не достигло 80, то задержка на 15 с и возвращение на М5. Если содержание счетчика достигло 80, то идем дальше.
342 <u>ОТКЛ</u> В НАГРЕВ	Отключить нагрев.
346 0 ⇒ <u>УПР</u> Р НАГРЕВ	Установить нулевое значение Р НАГРЕВ.
354 М6: <u>ЕСЛИ</u> К ТЕМП > U120, то:	Цикл М6: Если показание датчика температуры больше 1,2 В, то задержка 30 с и возврат на М6. Если меньше 1,2 В, то идем дальше.
[<u>ЖДАТЬ</u> 30, начать с М6:] <u>ИНАЧЕ</u>	Выключить высоковакуумную откачку.
400 <u>ОТКЛ</u> В ОТКАЧ	Задержка 5 с.
404 <u>ЖДАТЬ</u> 5	Отключить низковакуумную откачку.
410 <u>ОТКЛ</u> В КЛАПАН	Включить напуск в камеру.
412 <u>ВКЛ</u> В НАПУСК	Задержка 60 с, вернуться на М1.
416 <u>ЖДАТЬ</u> 60, начать с М1;	
430 <u>КОНЕЦ</u> ;	

Глава 7. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

7.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Этот вид оборудования является одним из самых распространенных в производстве интегральных микросхем и используется при создании в подложках диффузионных областей, легированных примесями, наращивании изолирующих слоев оксида и нитрида кремния и т. п. Диффузионное оборудование имеет следующие особенности:

одновременно обрабатываются 50...150 пластин;
обработка производится при температуре 350...1300 С;
реагенты подаются в зону обработки в газообразном виде (кислород, фосфин, силан и др.) либо в виде паров (вода).

Воспроизводимость процесса обработки из-за отсутствия способов получения информации о результатах обработки во время проведения процесса обеспечивается только за счет стабилизации влияющих факторов: времени, температуры 0,25...3 С, расходов реагентов 1...2%. Кроме того, для обеспечения минимального разброса эти требования должны выполняться в пределах всей зоны обработки. Например, разность температуры в любых точках рабочей зоны не должна превышать $\pm (0,25...3)$ С. Это приводит к существенному усложнению системы управления диффузионным оборудованием.

В последнее время в диффузионном оборудовании кроме температуры и расхода реагентов для ускорения и повышения качества обработки используются дополнительные воздействия на обрабатываемые подложки (пониженное либо повышенное давление, активация низкотемпературной плазмой и др.). Для уменьшения дефектов в диффузионном оборудовании применяют автоматические системы транспортирования и загрузки — выгрузки пластин, полностью исключая загрязнение обрабатываемых пластин оператором. Указанные тенденции в развитии диффузионного оборудования обуславливают непрерывное усложнение его систем управления.

В настоящее время в диффузионном оборудовании можно выделить два вида, отличающихся конструктивным исполнением:

с горизонтальным расположением нагревательных камер и компоновкой в модули по 3—4 камеры с общей системой загрузки — выгрузки;

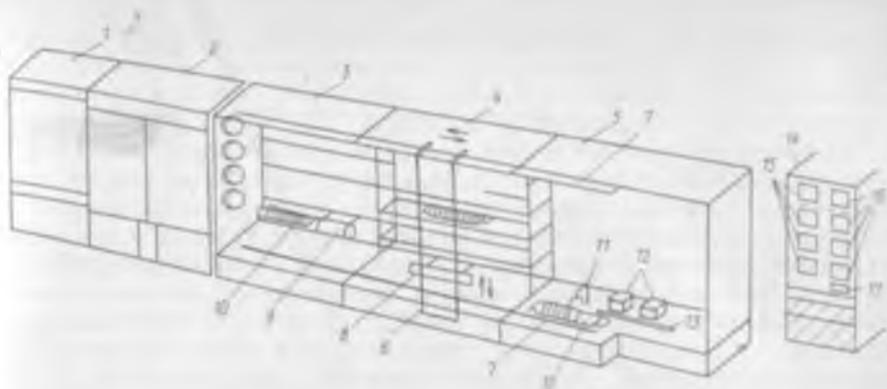


Рис. 7.1. Схема модуля диффузионной системы ACAMS

с вертикальным расположением отдельных нагревательных камер, обслуживаемых единой транспортной системой.

Недостаток первого вида диффузионного оборудования заключается в ограниченности транспортной системы перемещением пластин только в пределах одной диффузионной электропечи, что не позволяет создавать гибких производственных систем (ГПС) с числом нагревательных камер больше четырех.

Диффузионное оборудование второго вида строится на вертикальных нагревательных камерах, каждая из которых выполняется в виде отдельного модуля. Модули необходимых типов устанавливаются потребителем в линейку или в шахматном порядке и обслуживаются единой транспортной системой, обеспечивающей перемещение пластин между любыми модулями, а также в ячейки складирования. Преимущество такого оборудования состоит в высокой гибкости, что особенно важно при создании ГПС. Недостаток диффузионного оборудования второго вида состоит в повышенной чувствительности температуры в рабочей зоне вертикальных нагревательных камер к воздушной конвекции. В настоящее время наиболее широко используется диффузионное оборудование первого вида. Рассмотрим его подробнее.

Диффузионная система ACAMS. Система предназначена для проведения процессов диффузии, окисления, а также осаждения легированных слоев силикатного стекла при пониженном давлении и воздействии низкотемпературной плазмы. Система может содержать от 1 до 32 модулей, построенных на основе диффузионной электропечи.

Схема модуля показана на рис. 7.1. Обработка пластин производится в реакторах электропечи 2, в которую из газового шкафа 1 подаются необходимые реагенты, а пластины в кварцевых лодочках 10 загружаются консолью 9 загрузчика, которая движется по направляющим, закрепленным на вертикальной

стенке загрузчика 3. Консоль 9 может двигаться вдоль направляющей, а также поворачиваться на некоторый угол в вертикальной плоскости. Последнее позволяет освободить консоль, оставить лодочку 10 с пластинами в реакторе.

Основой транспортной системы являются две направляющие 7 для движения по ним рамы 6 с двумя вертикальными направляющими, по которым движется лифт 8. Длина направляющих 7 позволяет перемещать раму 6 от консоли загрузчика 9 до переукладчика пластин 5. Лодочка 10 захватывается штырями лифта 8 за уши. Любая лодочка с помощью транспортной системы может быть установлена в боксе 4, на консоли 9 или столе переукладчика пластин 5. Для уменьшения дефектности в зонах возможного нахождения пластин устанавливаются фильтры, создается ламинарное движение воздуха. В промежутках между разными стадиями обработки лодочки с пластинами хранятся в боксе 4. Система работает следующим образом.

Кассеты с пластинами 12 устанавливаются оператором в переукладчик 5. После этого запускается система управления. Пластины из кассет 12 пассиками 13 подаются на манипулятор 11, который укладывает их в лодочку 10. Транспортный механизм 6 захватывает лодочку и размещает в соответствии с программой обработки на одной из консолей 9 загрузчика 3. Консоль 9 загружает лодочку в рабочую зону реактора электропечи 2 и возвращается в исходное состояние. Пластины обрабатываются в электропечи 2, после чего извлекаются консолью 9 и транспортным механизмом 6 перемещаются в соответствии с технологическим маршрутом на консоль загрузчика другого реактора, в бокс или на стол переукладчика 5. На столе переукладчика 5 пластины манипулятором 11 подаются на пассики 13 и далее в кассеты 12. Работой модуля управляет оператор с помощью клавиатуры 16 шкафа управления 14. Информация о состоянии каждого реактора системы выводится на мониторы 15, а также хранится в кассетном накопителе 17.

Упрощенная функциональная схема системы управления приведена на рис. 7.2. Все модули имеют собственную локальную сеть передачи данных. Кроме модулей в систему управления входит центральная станция управления (ЦСУ) и станция анализа (СА).

По структуре СУ является двухуровневой. При этом верхний уровень образуют ЦСУ и СА, а нижний — системы управления модулями. Центральная СУ обслуживает все 32 модуля, кроме того, может обмениваться информацией с вышестоящей ЭВМ по протоколам SECSI, SECSII. Центральная СУ содержит монитор с клавиатурой, накопитель на магнитных дисках емкостью 20 Мбит, накопитель на гибких магнитных дисках, а также цифроречевое устройство. Станция анализа имеет цветные буквенно-цифровой и графический мониторы, на которые может выводиться измерительная и диагностическая информация о месте обработки

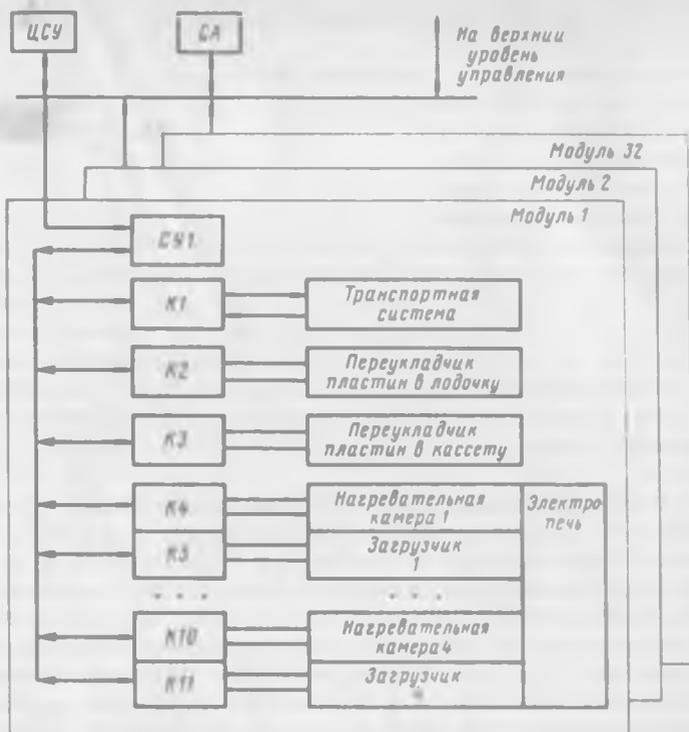


Рис. 7.2. Функциональная схема диффузионной системы ACAMS

(реакторе) каждого из модулей в виде таблиц и диаграмм. В ЦСУ системы поступает информация о ходе процесса обработки со всех 32 модулей, в том числе информация об аварийных состояниях. Эта информация хранится в накопителях и выводится на цветные мониторы СА. В частности, все аварийные состояния выводятся красным цветом.

В накопителях ЦСУ также хранятся варианты технологических программ (меню) для разных модулей, которые могут передаваться на модули для исполнения.

Нижний уровень управления системы (рис. 7.2) включает станцию управления СУ1, а также контроллеры К1...К11 модулей. Контроллер К1 обеспечивает управление транспортной системой, К2 — переукладчиком пластин из кассеты в лодочку, К3 — переукладчиком пластин в кассету, К4, К6, К8, К10 — нагревательными камерами, а К5, К7, К9, К11 — загрузчиками лодочек в нагревательную камеру. Все контроллеры модуля через интерфейс RC 232-C связаны между собой и станцией управления СУ1. Ядро системы управления модуля образуют контроллеры К4, К6, К8, К10, объединенные в стойку. Они управляют циклом работы соответствующих нагревательных камер.

Техническая характеристика контроллера:

Число временных интервалов	до 250
Максимальная длительность интервалов, ч	100
Число входов для подключения ТЭП	15
Разрядность по входам ТЭП	14 разрядов
Число аналоговых входов	32
Число аналоговых выходов	32
Число дискретных входов	64
Число дискретных выходов	88
Память	магнитная кассета, гибкие магнитные диски
Интерфейс	RS232-C
Тип микропроцессора	68 000 фирмы Motorola
Габаритные размеры, мм	600 x 700 x 1945

Программное обеспечение системы обеспечивает управление температурой нагревателей по ПИД-закону. Высокая точность измерения и регулирования температуры достигается использованием процедуры автоматической калибровки температуры, в результате которой устанавливается соответствие между температурой нагревателя и температурой в соответствующей рабочей точке реактора. Таблица температур между указанными точками хранится в виде таблицы поправок в ОЗУ контроллера. В каждом контроллере может храниться до десяти таблиц. Программа контроллера хранится в ПЗУ, а оператор имеет возможность задавать значения уставок по температуре, расходом газов, давлению, мощности ВЧ-излучения. Эти данные вводятся с клавиатуры и хранятся в ОЗУ.

На мониторы SATCII выводятся значения уставок с действительными значениями температуры, расходов газов, давления и других параметров технологического процесса. Кроме того, может выводиться информация о состояниях входов — выходов контроллера, а также диагностические сообщения.

Применение системы SATCII позволяет получить следующие характеристики электропечи:

Число зон регулирования температуры	5
Диапазон температуры, С	300...1300
Нестабильность температуры за 72 ч, С	$\pm 0,5$
Воспроизводимость температуры, С	$\pm 0,25$
Длина рабочей зоны при температуре $(900 \pm 0,5)$ С, мм	1000
Число загружаемых пластин	100...150
Время выхода на температуру 800 С, мин	15
Максимальная мощность, потребляемая одной камерой,	

кВ А 35

Мощность, потребляемая при температуре 1200 С,	
кВ А	12
Расход воздуха на охлаждение, м ³ /ч	3000
Расход воды, м ³ /ч	1
Напряжение питания, В	220/380
Габаритные размеры, мм	2450 × 800 × 2510
Масса, кг	1750

Контроллеры К1...К3 транспортной системы и переукладчиков пластин реализованы одинаково (контроллеры типа «команда — команда», «время — команда»). В отличие от рассмотренных контроллеров они не имеют мониторов и могут работать как в автоматическом, так и ручном режимах. В последнем случае для управления используется сенсорная панель управления. Информация о состоянии контроллеров транспортной системы и переукладчиков вводится на монитор ЦСУ, а также на сенсорную панель управления.

7.2. ВАКУУМНО-НАПЫЛИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Установка «Магна-2М» предназначена для нанесения в вакууме тонких пленок алюминия и его сплавов на кремниевые пластины при магнетронном распылении материалов. В основе работы установки лежит принцип последовательного нанесения пленок на непрерывно движущиеся кремниевые пластины путем распыления мишеней магнетронных распылительных устройств (магнетронов) ионами инертного газа. Установка имеет три магнетрона, что позволяет осаждать одно-, двух-, и трехслойные металлические пленки. Общий вид установки показан на рис. 7.3.

В состав установки, схема которой приведена на рис. 7.4, входят: рабочая камера 14 с нагревателем пластин 10, магнетронными устройствами распыления 12 и транспортной системой 6, 7, шлюзовые системы загрузки 1 и выгрузки 18, вакуумная система с паромасляным насосом 42 типа Н-5К и механическим форвакуумным насосом 39 типа ВНМ-18Г и агрегатом 32 типа АВР-50, газовая, пневматическая и гидравлическая системы.

Рабочая камера имеет в верхней части подъемную крышку, на которой последовательно крепятся три магнетрона 12 с датчиками измерения вакуума 13, 16 и натекателем рабочего газа — аргона 11. На водоохлаждаемых направляющих рабочей камеры в позициях нанесения пленки и резервной позиции 9 находятся плоские столы, по которым перемещается внутрикамерная система, выполненная в виде замкнутого конвейера. Корпус рабочей камеры охлаждается и прогревается водой. Нагреватель пластин 10 размещен перед зоной нанесения пленки и содержит инфракрасную лампу. Нагрев производится с нерабочей стороны пластины, которая проходит над нагревателем.



Рис. 7.3. Установка вакуумного нанесения тонких пленок многокомпонентных сплавов магнетронным распылением «Магна-2М»

Магнетронная распылительная система представляет собой сочетание диодной распылительной системы постоянного тока и магнитного поля, параллельного катоду и близко расположенного от него. Разряд диодной системы поддерживается с помощью вторичных электродов, испускаемых катодом под воздействием ионной бомбардировки. Электроны, не встречающие молекулы газа, двигаются в направлении анода и захватываются им. Магнитное поле, перпендикулярное электрическому, изменяет траектории электронов, закручивает их вокруг линий магнитного поля. Таким образом, увеличивается возможность ионизации газовых молекул вблизи катода за счет увеличения траектории вторичных электронов. При этом ионная плотность возрастает в зоне, близкой к катоду, что приводит к увеличению скорости распыления.

Глеющий разряд при применении магнитного поля поддерживается при давлении, более низком, чем без магнитного поля, за счет увеличения эффективности ионизации электронов. Магнетрон может работать при давлении до 10^{-1} Па и постоянном напряжении, что обеспечивает большую чистоту покрытий. Одним из недостатков магнетронной системы распыления является значительная неравномерность распыления мишени. Так как трудно создать плотное магнитное поле параллельно мишени, конструкции магнетронов позволяют получить параллельность поля только в локальных областях, что приводит к ограниченной зоне плотной плазмы. В связи с этим материал мишени распыляется неравномерно.

Магнетроны состоят из водоохлаждаемых катода, анода, мишени магнитного блока. Магнитный блок выполнен на основе постоянных магнитов. Для регулировки магнитного поля над

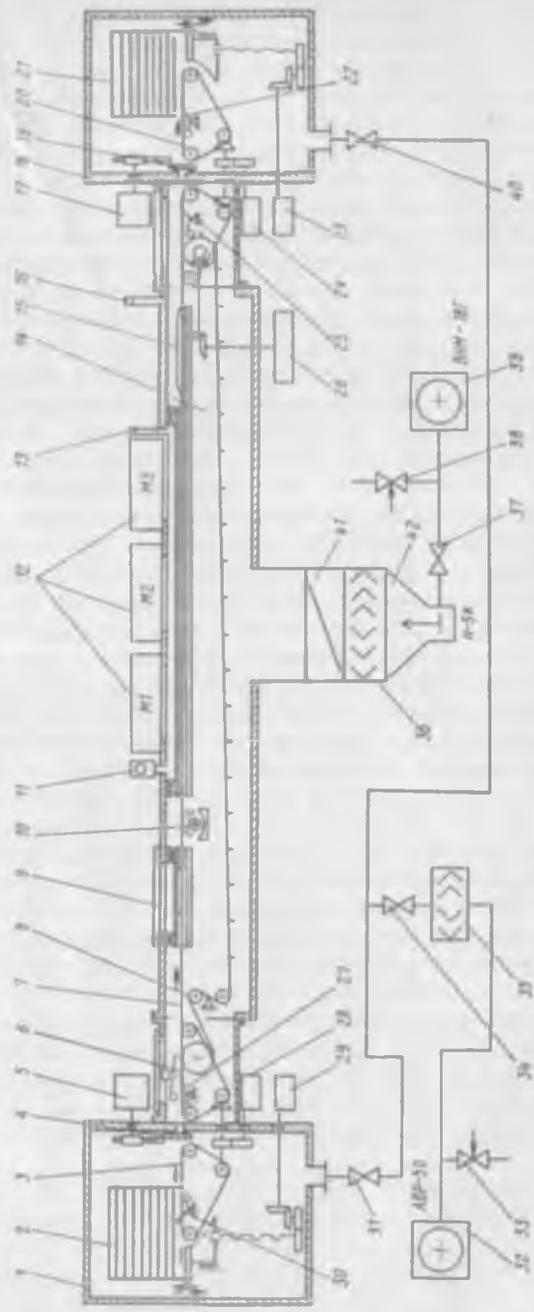


Рис. 7.4. Структурная схема вакуумной установки непрерывного действия

поверхностью мишени магнитный блок имеет возможность перемещения с помощью ручного привода. На анод и катод магнетрона подаются регулируемые постоянные напряжения соответственно до -700 и $+50$ В. Мишень находится в плотном контакте с катодом. Для получения пленок одинаковой толщины по всей поверхности пластин мишени, а соответственно и зоны распыления, имеют вытянутую эллиптическую форму. Округленные участки мишени находятся вне зоны осаждения пленок. Три магнетрона размещены последовательно в направлении перемещения пластин. Между магнетронами установлены экраны для ограничения площади осаждения пленок на пластине.

Транспортная система выполнена в виде замкнутого конвейера, состоящего из двух параллельных цепей, имеющих привод вращения 26 и устройство регулировки натяжения 8. На цепях устанавливаются захваты пластин. Для плавной укладки и съема пластин с конвейера в рабочей камере предусмотрены пассивы 6. Привод конвейера содержит двигатель постоянного тока и позволяет регулировать скорость перемещения пластин. Для охлаждения пластин после обработки имеется стол 15. В шлюзовой камере загрузки оператором устанавливается кассета с пластинами 2, а в шлюзовой камере выгрузки — пустая кассета 21, в которую загружаются пластины, прошедшие обработку. Для подачи пластин в рабочую камеру предусмотрены пассивы 3, а для выгрузки из камеры — пассивы 20.

В каждом шлюзе имеются механизмы перемещения кассет 23, 29, резиновые пассивы с приводами 24 и 28, затворы шлюза 4, 19 и их приводы 5, 17, а также датчики открытого и закрытого состояний двери и затворов шлюза, датчики верхнего и нижнего положений кассет, датчики шага кассет, датчики наличия пластин в кассете 30, 22 и на транспорте 25, 27. В состав высоковакуумного агрегата 42 входят также азотная ловушка 36, клапаны 37 и 38, устройство автоматической подачи азота в ловушку, затвор 41 типа ДУ-400. Высоковакуумный агрегат откачивает рабочую камеру установки как в начале работы, так и в рабочем режиме с подачей аргона в зону распыления. Агрегат АВР-50 производит форвакуумную откачку рабочей камеры и шлюзов и подсоединен к ним через систему трубопроводов с вакуумными клапанами 31, 33, 34, 40 типа ДУ-63 и азотной ловушкой 35. При залитой азотом ловушке агрегат АВР-50 позволяет откачивать шлюзы до давления $(1,3...6,65) \cdot 10^{-1}$ Па или $(1...5) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. В каждом шлюзе давление контролируется автоматическим вакуумметром 13ВТ3-003.

Высоковакуумный вакуумметр ВМБ-8 (16) рабочей камеры имеет блокировку на срабатывание при давлении $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па (1×10^{-4} мм рт. ст.). Эта блокировка разрешает включение нагревателя и магнетронов. Для контроля низкого вакуума в рабочей камере в формагистрале паромасляного насоса использован

вакуумметр 13ВТЗ-003. Датчиком давления аргона служит преобразователь МИ-27 (13), входящий в комплект вакуумметра ВИ-14.

Газовая система предназначена для подачи аргона через натекатели в магнетроны // и шлюзы. Для регулирования давления аргона на входах этих натекателей в газовой системе предусмотрены регуляторы давления. На каждый шлюз установлены два автоматических натекателя для напуска аргона и воздуха. Натекатель аргона открывается кратковременно при откачке шлюзовых камер для очистки их газовой среды, в результате чего уменьшается влияние остаточной атмосферы шлюзов на состав газовой среды рабочей камеры.

Пневматическая система обеспечивает подачу сжатого воздуха на клапаны вакуумной системы, а гидравлическая система подает холодную воду на корпус насоса Н-5К и в рабочую камеру с нагревательными магистралями. Горячая вода необходима для обезмасливания внутренних поверхностей рабочей камеры в процессе высоковакуумной откачки, а также перед напуском воздуха при ее разгерметизации.

На рис. 7.5 приведена структурная схема систем управления вакуумной установкой. Управление устройствами и механизмами установки производится от микропроцессорной системы управления «Орион-3», контроллера «жесткой» логики «Логикон», релейных блоков управления.

Работа установки начинается с откачки газа из рабочей и шлюзовых камер. Управление вакуумной системой с необходимыми блокировками осуществляется с помощью контроллера «Логикон» и релейного блока управления вакуумной системой (БУВС). Контроль давления производится соответствующими датчиками с вакуумметрами 13ВТЗ-003, ВМБ-8; результат контроля отображается на экране дисплея.

Кнопкой на мнемосхеме БУВС оператором установки включается двухступенчатый откачной агрегат АВР-50, и форвакуумная откачка рабочей камеры и шлюзов производится через открытые затворы шлюзовых камер загрузки—выгрузки. Одновременно включается форвакуумный насос ВМ-18Г для откачки паромасляного насоса.

После откачки рабочей камеры до давления 6,7 Па (5×10^{-2} мм рт. ст.) с помощью контроллера «Логикон» и блоков управления загрузкой—выгрузкой закрываются затворы шлюзов и клапаны. При включенном и нормально работающем паромасляном насосе открывается затвор ДУ-400 и ведется откачка рабочей камеры до необходимого предельного остаточного давления. «Орион-3» контролирует время получения вакуума, и если за 30 мин не удастся откачать рабочую камеру до давления $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па ($1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.), то на дисплее появляется диагностическое сообщение: «Плохой вакуум камеры». После открытия затвора ДУ-400 одновременная откачка шлюзов загрузки—

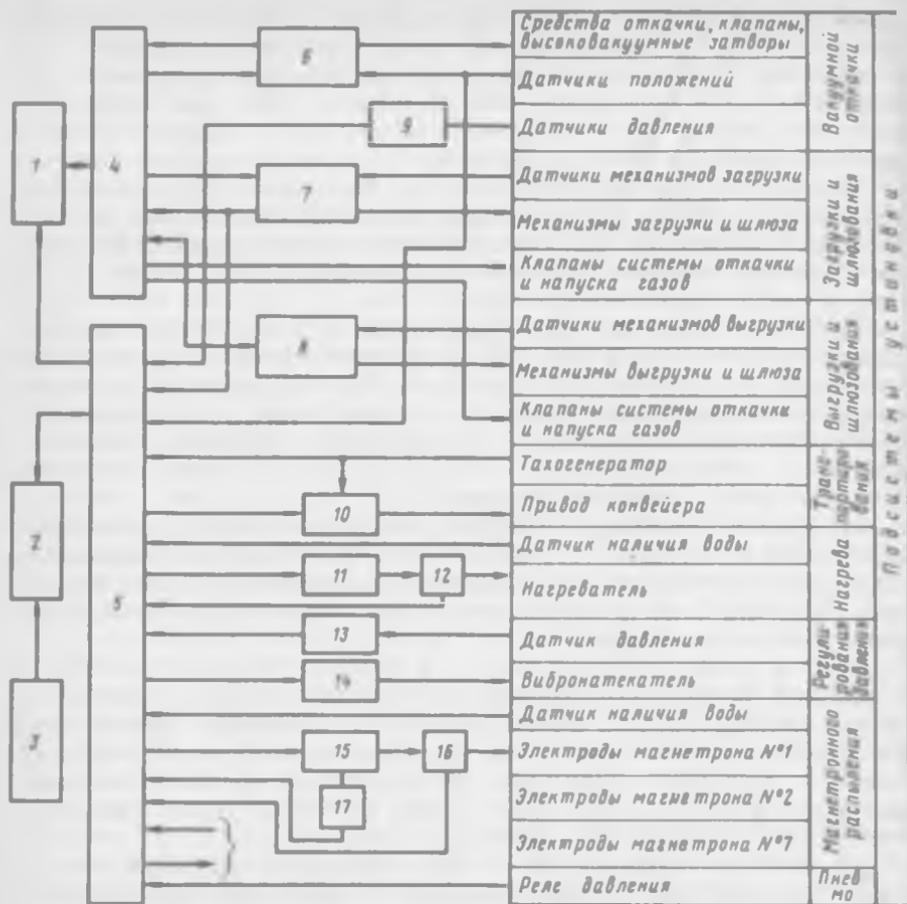


Рис. 7.5. Схема системы управления вакуумной установки «Магна-2М»:

1 — мнемосхема; 2 — дисплей; 3 — клавиатура; 4 — логический контроллер «Логикон»; 5 — МПСУ «Орбон-3»; 6 — блок управления вакуумной системой; 7 — блок управления системой загрузки; 8 — блок управления системой выгрузки; 9 — вакуумметры; 10, 11, 15 — тристорный усилитель и выпрямитель; 12, 16 — датчики тока; 13 — вакуумметр; 14 — блок управления нагревателем; 17 — датчик напряжения

выгрузки не разрешается. Производится поочередная откачка шлюзов, причем приоритет отдан шлюзу выгрузки. Это сделано для того, чтобы быстрее подготовить шлюз выгрузки к приему обработанных пластин.

В каждом шлюзе давление контролируется вакуумметром 13ВТ3-003. Вакуумметры имеют две ступени блокировки. При достижении первой ступени $13,3 \text{ Па}$ ($1 \cdot 10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$) разрешается подача в шлюз аргона для очистки его газовой среды. Вторая блокировка разрешает после достижения давления $1,3 \text{ Па}$ ($1 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$) открыть затвор шлюза. Вакуумная система

шлюзов производит их автоматическую откачку и продувку аргоном после открытия и закрытия дверей шлюзовых камер. Управление шлюзами загрузки — выгрузки выполняется релейными блоками управления и контроллером «Логикон». Диагностика работы шлюзов, команда на загрузку рабочей камеры осуществляются МПСУ «Орион-3» по показаниям датчиков.

В шлюз загрузки после его откачки и открывания затвора подается команда на опускание кассеты с пластинами вниз. При полном заполнении кассеты в ней помещается 25 пластин. Кассета опускается до датчика, фиксирующего наличие пластин в кассете. При появлении сигнала, разрешающего загрузку пластин на конвейер, включается привод пассиков в шлюзе, которые перемещают пластину из шлюза через окно в рабочую камеру, где она подхватывается резиновыми пассиками рабочей камеры и укладывается на конвейер. После того, как отключится датчик вызова пластин на конвейер, кассета опустится вниз до следующей пластины.

Когда все пластины из кассеты будут отправлены в рабочую камеру, кассета опустится вниз до датчика крайнего нижнего положения. По сигналу этого датчика и получении разрешения от «Орион-3» на окончание загрузки системой управления закрывается затвор шлюза, кассета поднимается в крайнее верхнее положение, в шлюз напускается воздух и включается сигнал на дисплее о необходимости смены кассеты.

Сигналы с датчика нахождения пластин на конвейере в его приемной части (рис. 7.4) поступают на вход «Орион-3» для счета числа загруженных пластин и на вход «Логикон» для управления пассиками. Если открыт затвор шлюза загрузки и пластина находится в кассете, но за 100 с она не загрузилась на конвейер, то «Орион-3» формирует и высвечивает на экране дисплея сообщение об аварии. В шлюзе выгрузки после установки приемной кассеты и закрытия двери включается клапан откачки и дается команда на опускание кассеты в крайнее нижнее положение. После открытия затвора включаются насосы и выдается команда на загрузку конвейера и укладку пластин в кассету. После того, как пластина войдет в ячейку кассеты, срабатывает датчик наличия пластин в кассете. По команде этого датчика кассета переместится вверх и будет ждать прихода очередной пластины. При наличии разрешения на автоматическую разгрузку и после прихода пластин в кассету «Орион-3» начинает считать время до прихода очередной пластины и сравнивает это время с расчетным временем. Если прошло расчетное время, отведенное на проход двух пластин, а пластин нет, то «Орион-3» воспринимает это как окончание обработки этой партии пластин. Оператор для установки новой кассеты в шлюзе загрузки должен открыть дверь, вынуть пустую кассету, установить кассету с пластинами и закрыть дверь шлюза. При этом автоматически включается клапан откачки шлюза.

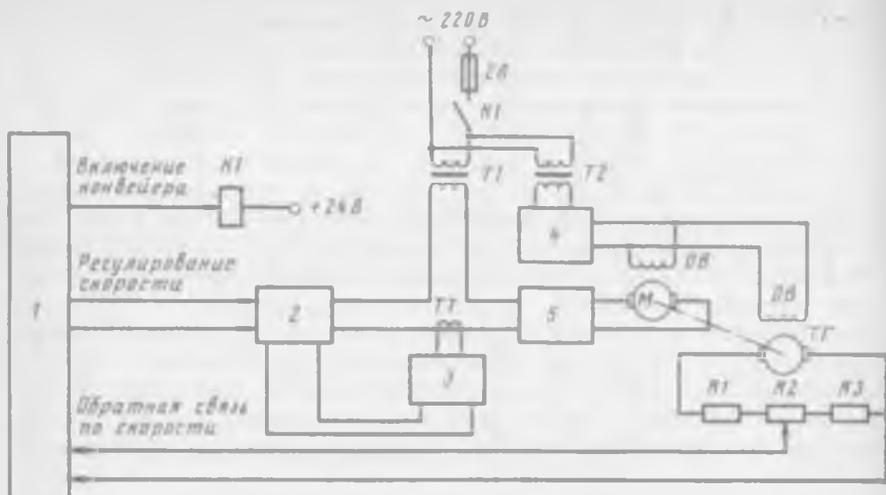


Рис. 7.6. Схема управления приводом конвейера:

1 МПСУ «Орион-3»; 2 тиристорный усилитель; 3,4,5 — выпрямители; K1 реле включения конвейера; T1, T2 понижающие трансформаторы; T3 трансформатор тока; ТГ тахогенератор; М — двигатель.

Управление приводом конвейера производится устройством «Орион-3», которое обеспечивает задание необходимой скорости перемещения и ее стабилизацию. Схема управления приводом приведена на рис. 7.6. Исполнительным элементом привода является двигатель постоянного тока М. На одном валу с двигателем размещен тахогенератор ТГ, выходное напряжение которого подается на вход «Орион-3» (модуль МПА-1) и используется в качестве сигнала обратной связи по скорости. С выхода «Орион-3» (модуль МВА-3) управляющий сигнал (0...10 В) подается на вход однофазного тиристорного усилителя 2, регулирующего напряжение на якоре двигателя. Выходное напряжение тиристорного усилителя выпрямляется с помощью силового полупроводникового выпрямителя 5. Датчик тока якоря служит для защиты от перегрузки в аварийных ситуациях. На экране дисплея отображается значение скорости конвейера.

Пластины, попадая из шлюза выгрузки на конвейер, проходят над нагревателем. Температура пластин зависит от интенсивности теплового потока нагревателя и скорости конвейера. Тепловой поток, излучаемый кварцевой лампой, поддерживается путем стабилизации тока на нагревателе. Управление нагревателем осуществляется «Орион-3», который позволяет запрограммировать ток нагревателя и стабилизировать его. Сигнал обратной связи поступает на модуль МПА-1 «Орион-3» с обмотки датчика тока I2 (см. рис. 7.5). С целью защиты элементов конструкции рабочей камеры от перегрева, в случае отсутствия охлаждающей

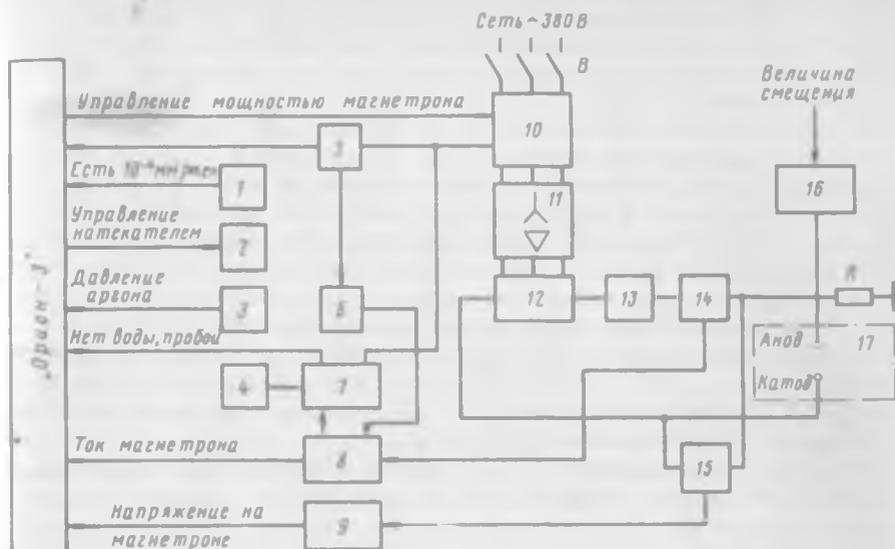


Рис. 7.7. Структурная схема управления магнетроном:

1 вакуумметр ВМБ-8; 2 блок управления нагрекателем; 3 вакуумметр ВИ-14; 4 реле воды магнетрона; 5 обратная связь по току; 6 инвертный повторитель; 7 устройство защиты от воды и пробоев; 8 датчик тока; 9 датчик напряжения; 10 тиристорный регулятор; 11 силовой трехфазный трансформатор; 12 выпрямитель; 13 фильтр; 14 настройка датчика тока; 15 настройка датчика напряжения; 16 устройство смещения; 17 магнетрон

воды, на вход «Орион-3» поступает сигнал с датчика наличия воды, по которому происходит блокировка управляющего воздействия на тиристорный регулятор. Фактическое значение тока и диагностика исправности устройств нагрева отображаются на экране дисплея.

Управление магнетронами производится МПСУ «Орион-3». На рис. 7.7 показана схема управления мощностью магнетрона. Скорость распыления, а следовательно, и толщина напыленного слоя пропорциональны мощности магнетрона. Регулирование мощности, подаваемой на магнетрон, осуществляется с помощью управляемого выпрямителя, который состоит из полупроводникового выпрямителя, собранного по трехфазной диодной схеме, трех однофазных трансформаторов, вторичные обмотки которых соединены в треугольник, а первичные — в звезду с нулевым проводом. Регулирование мощности выпрямителя производится трехфазным тиристорным регулятором, на вход которого подается сигнал с модуля МВА-3 «Орион-3».

Мощность магнетрона определяется в «Орион-3» по показаниям датчиков тока и напряжения. Этот сигнал, пропорциональный мощности, является сигналом обратной связи в системе регулирования мощности магнетрона. Управление магнетроном производится двухконтурной системой. Первым контуром явля-

ется контур стабилизации тока магнетрона, что обеспечивает устойчивое горение плазмы на малой мощности и снимает броски тока при пробоях и коротких замыканиях в магнетронах. Контур регулирования организован с помощью сигнала датчика тока, который через эмиттерный повторитель подается в цепь управления трехфазного регулятора. При превышении тока в катод больше 15 ± 3 А по сигналу датчика тока срабатывает устройство защиты и на вход тиристорного регулятора подается запирающий сигнал +24 В. При этом напряжение и ток на катод магнетрона уменьшаются до нуля, а при исчезновении короткого замыкания вновь восстанавливаются до первоначального значения. При отсутствии охлаждающей воды в магнетроне тиристорный регулятор закрыт сигналом от устройства защиты. В зону нанесения пленок с помощью автоматического вибрационного натекаателя подается рабочий газ — аргон. Стабилизация давления в зоне осаждения производится «Орион-3».

Глубину распыления мишени можно определить по количеству суммарной энергии, выделяемой на катод магнетрона в процессе нанесения пленки. Эта суммарная энергия, по которой можно оценить ресурс работы мишени, подсчитывается «Орион-3», а на экране дисплея в процентах отображается значение оставшегося ресурса работы мишени магнетрона.

Контроль за состоянием пневматической системы осуществляется микропроцессорной системой по сигналу датчика давления. Микропроцессорная система управления установкой построена на основе микропроцессорных технических средств управления «Орион-3» (блок управления БУ-3Г) с платой перепрограммируемого запоминающего устройства (УЗПП), в которой записана программа управления. Ввод информации осуществляется с клавиатуры дисплея 15ИЭ-00-13, на экране которого отображается необходимая для управления информация. Микропроцессорная система реализует следующие функции управления: программирование; управление циклом и параметрами; диагностирование и контроль; отображение информации.

В режиме программирования оператор может задать требуемые параметры:

Скорость конвейера, мм/мин	120...400
Ток нагревателя, А	2,0...4,0
Давление аргона в зоне распыления, Па	$1,3 \cdot 10^{-1}$... $1,3 (1 \cdot 10^{-3})$...
	$1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.)
Мощность магнетрона, кВт	0...6
Ресурс работы мишени, %	100...10
Шаг цепи конвейера, мм	75...125

Кроме параметров можно задать режим тренировки мишеней магнетронов. В режиме управления микропроцессорная система обеспечивает регулирование скорости движения конвейера, тока

нагревателя, давления аргона в зоне распыления, мощности магнетронов и выдает команды управления циклом.

При тренировке мишенной система выводит магнетроны на заданную мощность со скоростью $(0,2 \pm 0,1)$ кВт/мин.

Управляя циклом совместно с контроллером «Логикон» и релейными блоками, «Орион-3» дает разрешение шлюзу загрузки на окончание работы, считает число загружаемых и выгружаемых пластин, рассчитывает время прохода двух пластин, определяет разрыв ряда обрабатываемых пластин по времени и дает команду на окончание работы шлюза выгрузки после приема партии пластин. На микропроцессорную систему возложены блокировки, которые обеспечивают безопасность функционирования устройства механизмов установки. Режимы «Пуск» и «Сброс» реализуются с клавиатуры дисплея.

Управляющей программой предусматривается проведение диагностики работы агрегатов и устройств и функциональных подсистем. На экране дисплея могут выводиться следующие диагностические сообщения (высвечиваются в нижней части экрана):

НЕТ СЖАТОГО ВОЗДУХА
ПАРОМАСЛЯНЫЙ НАСОС ВЫКЛЮЧЕН
ЗАТВОР ЗАКРЫТ
МЕДЛЕННАЯ ОТКАЧКА КАМЕРЫ
ЗАТОР
НЕТ ВОДЫ M1
НЕТ ВОДЫ M2
НЕТ ВОДЫ M3
НЕТ ВОДЫ НАГРЕВАТЕЛЯ
ПЛОХОЙ ВАКУУМ В КАМЕРЕ
НЕТ ПОДАЧИ ПЛАСТИН НА КОНВЕЙЕР
МЕДЛЕННАЯ ОТКАЧКА ШЛЮЗА ЗАГРУЗКИ
КАССЕТА ЗАГРУЗКИ ПУСТА
ЗАГРУЖАТЬ МОЖНО
ВЫГРУЖАТЬ МОЖНО
МЕДЛЕННАЯ ОТКАЧКА ШЛЮЗА ВЫГРУЗКИ
ОТКАЧКА КАМЕРЫ
КАССЕТА ВЫГРУЗКИ ЗАНЯТА

Управление с помощью дисплея осуществляется путем выбора тех или иных режимов, устанавливаемых с использованием «меню». Страница дисплея в состоянии «меню» имеет вид:

С1 ПУСК
СБР СБРОС
ПРМ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

Благодаря наличию каналов связи с вышестоящей системой управления установка может передавать на верхний уровень информацию о протекании технологического процесса, диагностические сообщения.

Алгоритм управления представлен в виде релейно-контактной схемы. Расшифровка всех сигналов (X) и команд (Y), а также промежуточных команд (MA) представляется в техническом описании на установку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнилов Р. В., Саидеров В. Л. Расчет комплексов оборудования микроэлектроники. — М.: Энергия, 1979. — 104 с.
2. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. — М.: Радио и связь, 1987. — 464 с.
3. Оборудование полупроводникового производства. Под ред. П. Н. Масленникова. — М.: Радио и связь, 1981. — 336 с.
4. Блинов И. Г., Кожитов Л. В. Оборудование полупроводникового производства. — М.: Машиностроение, 1986. — 264 с.
5. Автоматизированная линия, позволяющая ускорить изготовление нестандартных интегральных схем: Р. Г. Браннер, И. Дж. Холден, Дж. С. Лабер и др. // Электроника, 1981, № 2. — С. 40 — 50.
6. Микропроцессоры. Кн. 1. Архитектура и проектирование микроЭВМ. Организация вычислительных процессов. Под ред. Л. Н. Преснухина. — М.: Высшая школа, 1986. — 495 с.
7. Однокристалльные микропроцессоры комплекта БИС серии K1801 В. Л. Дшхунян, Ю. И. Борщенко, В. Р. Науменков и др. // Микропроцессорные средства и системы. — 1984. — № 4. — С. 12 — 18.
8. Преснухин Л. Н., Шахнов В. А. Конструирование электронных вычислительных машин и систем. — М.: Высшая школа, 1986, 512 с.
9. Гигис Э. И., Пискунов Е. А. Аналого-цифровые преобразователи; Учебное пособие для вузов. — М.: Энергоиздат, 1981. — 360 с.
10. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы — М.: Энергия, 1978, 704 с.
11. Прангинвили И. В. Микропроцессоры и локальные сети микроЭВМ в распределенных системах управления — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 272 с.
12. Глудкин О. П., Обичкин Ю. Г., Блюхи В. Г. Статистические методы в технологии производства радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. В. Н. Черняева. — М.: Энергия, 1977. — 296 с.
13. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981. — 488 с.
14. Проектирование радиоэлектронных устройств на интегральных микросхемах/ Под ред. С. Я. Шаша — М.: Сов. радио, 1976. — 312 с.
15. Щербakov О. А. Особенности применения ПЛМ в микропроцессорных системах. Микропроцессорные средства и системы, 1986. — № 2. — С. 80 — 85.
16. Бутомо И. Д., Самочалин А. В., Усанова Д. В. Программирование на алгоритмическом языке Паскаль для микроЭВМ. — Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1985. — 216 с.
17. Егорова Т. Н. Комплексный подход к разработке систем автоматизации программирования микропроцессорных управляющих комплексов. — Электронная техника. Сер. 7. — 1983. — Вып. 1(116). С. 82 — 83.
18. Computer automated manufacturing system ACAMS // проспект фирмы ASM, 1986.
19. Вакуумная установка непрерывного действия для нанесения пленок магнетронным распылением Ю. Я. Мелехин, В. Е. Миняйчев, В. В. Одинокоев и др. // Электронная промышленность. — Вып. 1982. 2(140). С. 51 — 52.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Алгоритм расчета погрешности	195	Комплекс диалоговый вычислитель-	
— управления	161	ный (ДВК)	54
— процессом загрузки — выгруз-		— микропроцессорный (МПК)	46
ки	227	— оборудования	12
— функционирования	152, 153	— для химической обработки	17, 20—22
— механизмов устройства загрузки	233		
Блок управления (БУ)	124	Контроллер:	
Большая интегральная схема		программируемый комбинирован-	
(БИС)	44, 51	ный (ПКК)	92, 97, 98
Ванна	16	— структурная схема	99
Выбор периода квантования	157, 158	— логический (ПЛК)	92, 94
Гибкая автоматизированная система		— — классы	94
(ГПС)	13, 15	— — состав	95
Диагностика, задачи	182, 183	— регулирующий (ПРК)	92, 96
— функциональная	183	— — состав	96
Диагностирование работоспособности:		— структурная схема	93
автоматическое	181	специализированный	92
тестовое	181	Линейризация градуировочных харак-	
технологического оборудования	181	теристик	170
Диаграмма точностная	148, 149	— метод аппроксимации	171
Дисплей	144	— — обратной функции	170
Диффузия	7	Литография электронно-лучевая	
— бора двухстадийная	8	(ЭЛЛ)	29
— термическая	32	— — технология	29
— метод «открытой трубы»	32	Макстерм	165
— фосфора	8	Машина электронная вычислительная	
Загрязнение	16	микропроцессорная (микро-	
Задача оптимального программного		ЭВМ)	46, 54
управления	152	— архитектура	46
Избыточность:		— однокристалльная	
аппаратная	181, 182	(ОЭВМ)	46
временная	182	Меню	221
информационная	181, 182	Метод получения тонких слоев	37
Имплантация ионная	34	— распыление ионно-плазмен-	
Интерпретатор	198	ное	39
Интерфейс	44, 54, 57	— катодное	38, 39
— классификация	61, 62	— термовакуумное	37, 38
— малый	61	Микроконтроллер (МК)	47
— радиальный	61, 62	Микропроцессор (МП)	44, 50, 51
— системный	61	— однокристалльный (ОМП)	45, 52
— стандартный механический	14	— разрядность	44, 51
элементная база	62	— секционированный	45, 52
Канал:		— типы	52
аттестация	187	Микросхема интегральная микропро-	
замкнутый	186, 191	цессорная	44
оценка погрешности	187, 194	Микротранзистор	6
погрешность на выходе	186	Минтерм	165
расчет методической погрешнос-		Мнемосхема	143
ти	191	Модуль:	
точностные характеристики	192	выдачи сигналов аналоговых (МВА-	
— — методика оценки	192	3)	90, 92
Ключ гиристорный	119, 121	— — функциональная схема	91
— транзисторный	121	— дискретных (МВД-1)	87
Команда	49	обмена с оптронной развязкой	
Компилятор	198	(МОО-3)	84, 85
		— режимы работы	85, 86

приема сигналов аналоговых (МПА-4)	87, 89		
— функциональная схема	88		
— дискретных (МДП-1)	87		
процессорный	55, 60		
Монитор	199		
Обеспечение программное (ПО):			
кроссовое	196		
основная задача	218		
прикладное (ППО)	196		
разработки	196		
резидентное	196		
системное (СПО)	196		
Оборудование:			
диффузионное	242		
— виды	242, 243		
— система АСАМС	243		
технологическое	39		
— датчики параметров	41		
— измерительные преобразователи	41, 42		
— микропроцессорная система управления (МПСУ)	41		
подсистема энергообеспечения	40, 41		
— подсистемы функциональные	39, 40		
— специальное (СТО)	123		
— система управления	123		
— устройства ввода и отображения информации	43		
Обработка поверхности:			
метод вакуумно-плазменный	16, 17		
— типы процессов	17		
— химический	16		
основные операции	15		
Операнд	49		
Печь диффузионная	32		
Подсистема:			
отображения и документирования информации	143		
регулирования газовыми потоками	137, 138		
— температуры	130		
управления плазмохимической обработкой	133, 137		
— транспортными механизмами	142		
Порты ввода или вывода	47		
Преобразователь:			
аналого-цифровой	80		
измерительный	102		
— погрешность преобразования	102		
напряжения в код (ПНК)	68		
— свойства	73, 74		
— состав	69		
температуры вторичный	106		
— функциональная схема	106		
— первичный	103		
— группы	103, 104		
Прерывание	49		
Программа управления	219		
Производство ИМС	5		
— фаза заготовительная	5		
— обрабатывающая	5		
— сборочно-контрольная	5		
Процесс:			
сушки	27		
технологический, воспроизводимость	149		
— контроль	149		
— стабильность	149		
— устойчивость	149		
Проявление	28		
Реактор планетарный	23		
— цилиндрический	23		
Регистр многорежимный буферный (МБР)	64		
Регистры общего назначения (РОН)	48		
Редактор связей	198		
Режим прямого доступа к памяти	49		
Секция микропроцессорная	44		
Система:			
дискровая операционная (ДОС) малой длительности цикла (QTAT)	14, 15		
резидентная операционная (РОС)	199		
транспортная	13—15		
управления децентрализованного	125, 127		
— уровни	128		
— микропроцессорная (МПСУ)	48, 55		
— производством единая	14		
— обобщенная модель	152		
— централизованного	124		
Слой оксида	39		
— способы получения	39		
— эпитаксиальный	35		
— получение	36		
Стек	48		
Счетчик команд	48		
Термометр сопротивления	104, 105		
Технология планарная	6		
— планарно-эпитаксиальная	6, 8		
Топология ИМС	24		
— формирование	24		
Травление:			
ионное	17		
ионно-химическое	17		
плазмохимическое	17		
Уровень сопряжения модулей и устройств	61		
Усилитель тиристорный	111		
— блок управления	114, 115, 117		
— схема	112		
Установка для печати	27, 28		

Устройство:	
ввода — вывода	47
запоминающее (ЗУ)	45
внешнее (ВЗУ)	47
оперативное (ОЗУ)	45
— постоянное (ПЗУ)	45
— программируемое (ППЗУ)	45
— репрограммируемое (РПЗУ)	45
периферийное или внешнее	47
связи с объектом (УСО)	47
Формирование топологии	27
Формирователь шинный (ШФ)	62, 63
Фотолитография	26
— технологический процесс	26
Функции логические	161
Характеристики рабочего объема	11
Цель	215, 216
— формат	215, 216
Шина	46
— адреса	55
— двунаправленная	47, 55
— управляющая	55
Экспонирование	25

Этапы развития машиностроения	10, 11
Язык:	
ассемблера	199, 200
— комментарий	200
— метка	200
— поле операндов	200
— способ адресации	200, 201
булевых уравнений	217
Паскаль	206
— операторы	211
— основные определения	207
— структура программы	207
— тип данных	208
программирования	205
— алгоритмический	206
— машинно-зависимый	206
— проблемно-ориентированный	205, 214
— процедурно-ориентированный	205
релейно-контактных символов	215

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Глава 1. управление в производстве изделий микроэлектроники	5
1.1. Структура технологических процессов производства интегральных микросхем	5
1.2. Развитие технологического оборудования автоматизированного производства	10
1.3. Оборудование для обработки поверхности	15
1.4. Литографическое оборудование	26
1.5. Физико-термическое оборудование	32
1.6. Оборудование для нанесения слоев	36
1.7. Структура технологического оборудования	41
Глава 2. средства автоматизации технологического оборудования	44
2.1. Управляющие устройства на базе микроЭВМ и микропроцессорных комплектов БИС	44
2.2. Интерфейсы микропроцессорных систем	60
2.3. Устройства связи с объектом	68
2.4. Контроллеры	92
2.5. Измерительные преобразователи	101
2.6. Усилители и преобразователи сигналов	111
Глава 3. структура и состав микропроцессорных систем управления	123
3.1. Структура микропроцессорных систем управления оборудованием	123
3.2. Многоуровневые системы децентрализованного управления	127
3.3. Подсистемы управления температурными режимами	129
3.4. Подсистемы управления плазмохимической обработкой	133
3.5. Подсистемы управления газовыми потоками	137
3.6. Подсистемы управления транспортными механизмами	142
3.7. Подсистемы отображения и документирования информации	143
Глава 4. алгоритмы управления качеством технологических процессов	148
4.1. Задачи управления технологическим оборудованием	148
4.2. Алгоритмы управления параметрами технологических процессов	155

4.3.	Алгоритмы управления последовательностью технологического цикла	163
4.4.	Специальные алгоритмы обработки технологической информации	170
4.5.	Алгоритмы диагностики работоспособности технологического оборудования	180
4.6.	Методы аттестации средств автоматизации	184
Глава 5.	ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ	196
5.1.	Общие принципы построения программного обеспечения микропроцессорных систем	196
5.2.	Язык ассемблера микроЭВМ	199
5.3.	Алгоритмический язык Паскаль	205
5.4.	Языки программирования пользователя	214
Глава 6.	ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ	224
6.1.	Программирование задач управления параметрами	224
6.2.	Программирование задач управления последовательностью технологического цикла	225
6.3.	Программирование задач обработки информации	230
6.4.	Программирование задач управления на языках пользователя	233
Глава 7.	ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ	242
7.1.	Оборудование для диффузионных процессов	242
7.2.	Вакуумно-напылительное оборудование	247
	Список литературы	258
	Предметный указатель	259

Учебное издание

*Сазонов Александр Афанасьевич
Корнилов Ростислав Васильевич
Кохан Николай Петрович
Кузнецов Михаил Николаевич
Поддубный Евгений Васильевич*

МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
Учебное пособие

Заведующий редакцией *П. И. Никонов* Редактор *Н. К. Калинин*

Художественный редактор *А. С. Широкая* Переплет художника *Ю. В. Архангельского*

Технический редактор *З. Н. Ратникова* Корректор *А. К. Акименкова*

ИБ № 1503

Сдано в набор 10.2.88 Подписано в печать 23.08.88 Т-15 566 Формат 60x88/16. Бумага офсетная № 2
Гарнитура литературная Печать офсетная Усл. печ. л. 16,17 Усл. кр.-отт. 16,17 Уч.-изд. л. 17,93
Тираж 15 000 экз. Изд. № 21744 Зак. № 2509 Цена 90 к.

Издательство «Радио и связь» 101000, Москва, Почтамт, а/я 693

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054, Москва, Валовая, 28.