Профессиональное образование

С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСЛОЖНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие

Профессиональный модуль



ACADEMA

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

С. М. АНДРЕЕВ, Б. Н. ПАРСУНКИН

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСЛОЖНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рекомендовано
Федеральным государственным автономным учреждением «Федеральный институт развития образования» (ФГАУ «ФИРО»)
в качестве учебного пособия для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы среднего профессионального образования по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)»

Регистрационный номер рецензии 390 от 23 июля 2015 г. ФГАУ «ФИРО»

ACADEMIA

Москва
Издательский центр «Академия»
2016

УДК 681.5(075.8)
ББК 32.965я723
А655

Рецензент —
проректор по учебной работе ФГБОУ ВПО НИУ «Южно-Уральский государственный университет», д-р техн. наук, проф. *А. А. Радионов*

Андреев С. М.

А655 Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин. — М. : Издательский центр «Академия», 2016. — 272 с.

ISBN 978-5-4468-1768-9

Учебное пособие создано в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом среднего профессионального образования по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)», ПМ.04 «Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов».

Рассмотрены принципы разработки и моделирования систем автоматизации технологических процессов и мехатронных систем; приведены основные понятия теории управления, назначение, принципы построения и математическое описание контуров автоматического регулирования; представлены динамические характеристики элементов и систем управления. Дана классификация технических средств систем автоматизации: датчиков технологических величин, исполнительных устройств, технологических контроллеров и показана их взаимосвязь с интегрированной системой проектирования и управления АСУ ТП. Приведены примеры проектирования систем автоматизации отдельных технологических параметров.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 681.5(075.8)
ББК 32.965я723

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

ISBN 978-5-4468-1768-9

© Андреев С. М., Парсункин Б. Н., 2016
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2016
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2016

Уважаемый читатель!

Данное учебное пособие является частью учебно-методического комплекта по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)».

Учебное пособие предназначено для изучения профессионального модуля ПМ.04 «Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит в себе учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включены терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

Введение

В последние десятилетия XX в. были четко сформулированы современные концепции иерархического построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) промышленного производства, основанные на использовании цифровых методов преобразования, обработки, передачи и хранения информации. Особенно кардинально изменились технические средства обработки и обмена оперативной информацией при существующих принципах реализации датчиков технологических параметров, исполнительных механизмов и методов формирования типовых законов управления.

Системы управления, в работе которых принимает участие человек, называют *автоматизированными системами*. В автоматизированном производстве человеку отводятся лишь задачи периодического воздействия на главные машины, механизмы и установки, формирования заданий для системы управления, а также наблюдения за наиболее важными параметрами технологического процесса по показаниям приборов.

Системы управления, в работе которых человек участия не принимает, называют *автоматическими системами*.

Автоматизация — процесс, при котором функции управления и контроля осуществляются методами и средствами автоматики, исключающими участие человека. В применении к любому производству автоматизация характеризируется освобождением человека от непосредственного выполнения функций управления производственными процессами и передачей этих функций автоматическим устройствам. Автоматизация предполагает управление машинами, механизмами и установками, а также контроль за их состоянием с помощью специальных устройств без участия человека или при частичном его участии.

Автоматизация процессов и установок осуществляется с помощью систем управления, которые выполняют следующие основные функции:

- контроль (измерение) текущих значений параметров технологического процесса;

- сигнализация о состоянии оборудования;
- дистанционное управление машинами и механизмами;
- автоматическая защита оборудования от возможных повреждений в процессе эксплуатации;
- автоматическое непрерывное регулирование технологических процессов и управление основными и вспомогательными установками.

В начальный период развития микропроцессорной техники широкое распространение при реализации систем автоматизации во многих отраслях промышленного производства получили технические средства управления с жесткой логической структурой формирования управляющих воздействий. Одновременно становилось очевидным, что наиболее перспективным направлением развития технических средств АСУ ТП является использование свободно программируемых универсальных технических средств автоматического управления.

В процессе развития технических микропроцессорных программируемых средств автоматизации произошло разделение этих средств на два в и д а:

- технические средства на базе универсальных управляющих вычислительных машин (УВМ);
- технические средства на основе простых УВМ и микропроцессорных регулирующих контроллеров (МРК), ориентированных на решение определенных управляющих проблем по автоматизации производственных процессов.

Современные АСУ ТП промышленного производства представляют собой разумное сочетание двух видов средств автоматизации.

Одновременно с совершенствованием традиционных средств автоматического контроля и управления широкое распространение при синтезе АСУ ТП получили готовые стандартные программные блоки (модули) и программные технологии. Это позволило обеспечить системе приобретение важных свойств — модульности и масштабируемости, т. е. способности создаваемой АСУ ТП адаптироваться к расширению предъявляемых технологических требований и возрастанию объемов решаемых задач по управлению параметрами технологических процессов.

Современная структура АСУ ТП формируется по иерархическому принципу и содержит несколько управляющих уровней со строгим ограничением круга и возможностей решения задач по управлению технологическим процессом, причем внутренняя архитектура каждой подсистемы аналогична общей структуре.

Использование иерархической структуры АСУ ТП позволяет создавать типовые решения, которые можно приспособить под любые возможные потребности производства в автоматическом управлении и модернизации отдельных элементов системы без изменения остальных элементов.

В настоящее время практически все мировые производители компонентов и технических средств АСУ ТП придерживаются следующих принципов их построения:

- открытость и адаптивность архитектуры АСУ ТП к различным применениям;
- унификация и стандартизация всех аппаратно-программных компонентов АСУ ТП на основе широкого использования базовых технологий;
- функциональная и аппаратная интеграция;
- высокий уровень технологичности процесса разработки АСУ ТП, в том числе аппаратных средств, таких как датчики и исполнительные механизмы;
- введение ограничений на совокупную стоимость АСУ ТП и ее обслуживание.

ЧАСТЬ I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСЛОЖНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Глава 1. Методы и функции управления технологическими процессами

Глава 2. Системы автоматизации технологических процессов

Глава 3. Конструкция и принципы работы типовых элементов систем автоматизации

Глава 4. Интегрированные системы проектирования и управления

Глава 1

МЕТОДЫ И ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ, ЦЕЛИ И ФУНКЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

При автоматизации технических и производственных объектов нередко приходится решать функционально различные задачи, которые возлагаются на отдельные подсистемы, входящие в общую схему автоматизации объектов.

Классификация систем автоматического управления может осуществляться по различным принципам и признакам, характеризующим назначение и конструкцию систем, используемым алгоритмам управления и функционирования, виду применяемой энергии и т. д.

По назначению системы автоматизации подразделяют на три класса: информационные, управляющие и защитные (рис. 1.1).

Информационные системы объединяют подсистемы контроля и сигнализации.

Подсистема *контроля* обеспечивает получение количественных (измерения) и качественных (индикация) показателей автоматизированного объекта с помощью контрольно-измерительных приборов (КИП).

Подсистема *сигнализации* использует те же технические средства, что и подсистема контроля, но отличается формой представления информации — в виде светового, звукового или другого сигнала.

Функционально подсистемы сигнализации подразделяют на командные, контрольные, предупредительные и аварийные.

Основное требование к информационным системам — достаточная информативность, а также передача информации без искажений и задержек.

Управляющие системы включают в себя подсистемы автоматизации, которые на основе полученной информации воздействуют на объект управления. В этот класс входят подсистемы автоматического регулирования (САР), управления (САУ) и автоматизированные системы управления (АСУ).

Системы автоматического регулирования предназначены для поддержания постоянной или изменения по заданному закону некоторой управляемой величины.

Системы автоматического управления осуществляют совокупность воздействий на объект, направленных на достижение определенного критерия управления.

В общем случае САР и САУ могут строиться как на основе локальных средств автоматики (регуляторов), так и с применением вычислительной техники.

Автоматизированные системы управления позволяют управлять объектом совместными действиями технических устройств и человека с обязательным применением вычислительной техники. В этом случае технические устройства решают стандартные задачи управления, производят необходимые вычисления, а также обеспечивают информацией человека, который решает нестандартные задачи управления.

Среди АСУ различают автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) и системы управления производством (АСУП), которые по своей сути могут быть отнесены к информационным системам.

Защитные системы автоматизации играют важную роль в технике. Системы этого класса работают только в автоматическом режиме, без участия человека и защищают объекты от недопустимых отклонений технологических параметров от нормы, а также от возникновения аварийных ситуаций.

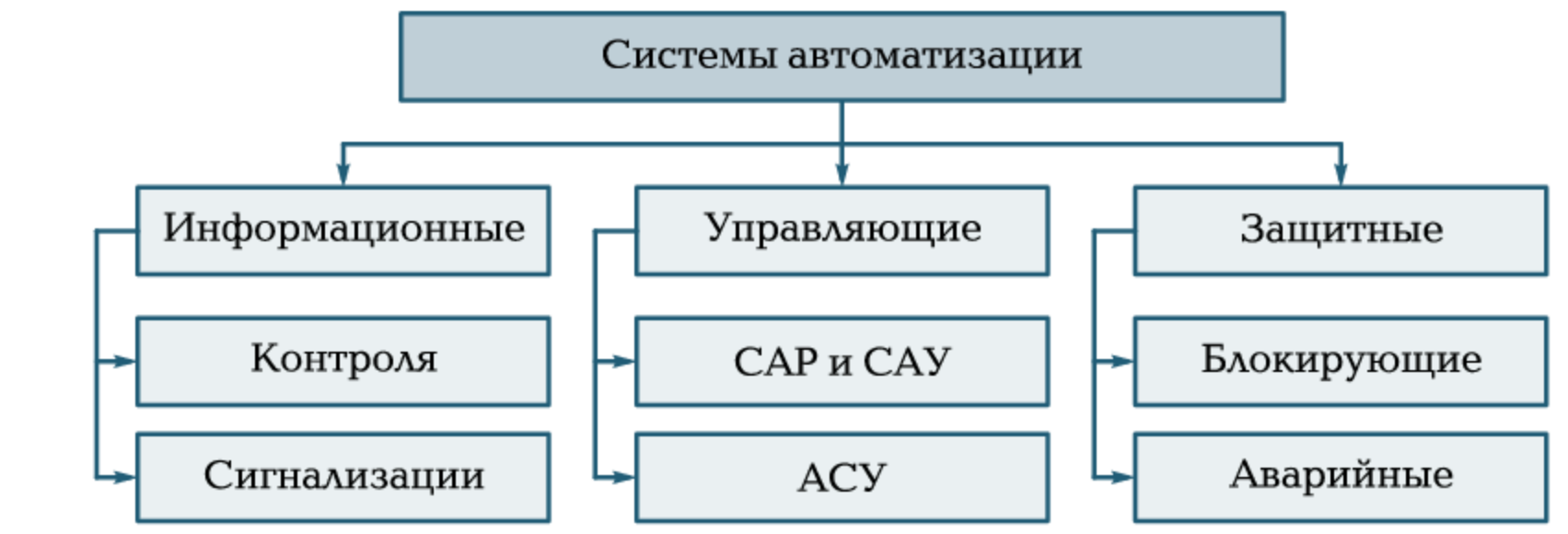


Рис. 1.1. Классификация систем управления

При автоматической защите объектов различают объектные (*блокирующие системы*) и межобъектные (*синхронизирующая защита*) блокировки. В результате срабатывания систем блокировок и защит либо прекращается доступ материальных и энергетических потоков к защищаемым объектам, либо включаются *аварийные системы* (пожаротушение, вентиляция и т. д.).

1.2. СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ СОВРЕМЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Автоматизированная система управления технологическими процессами имеет иерархическую структуру, состоящую, как правило, из трех уровней, и выполняет следующие функции (ГОСТ 34.003—90):

- управляющие — функции, включающие получение информации о состоянии технологического объекта управления, оценку полученной информации, выбор управляющих воздействий и их реализацию;
- информационные — функции, предполагающие обработку и передачу информации персоналу АСУ ТП или другой системы о состоянии технологического объекта управления или внешней среды;
- вспомогательные — функции, обеспечивающие контроль состояния функционирования технических и программных средств собственно системы.

Управляющие функции АСУ ТП. К управляющим относят функции (рис. 1.2):

- автоматического регулирования;
- дистанционного управления;
- технологических защит и блокировок.

Функции ***автоматического регулирования*** предусматривают автоматическую стабилизацию (*непрерывное управление*) или изменение по заданным законам непрерывных параметров технологических процессов, а также *дискретное* (логическое) и *функционально-групповое управление*.

Дискретное (*логическое*) *управление* используется для контроля состояния запорной арматуры, механизмов, реле, концевых и путевых выключателей, датчиков наличия, индикаторов и сигнализато-

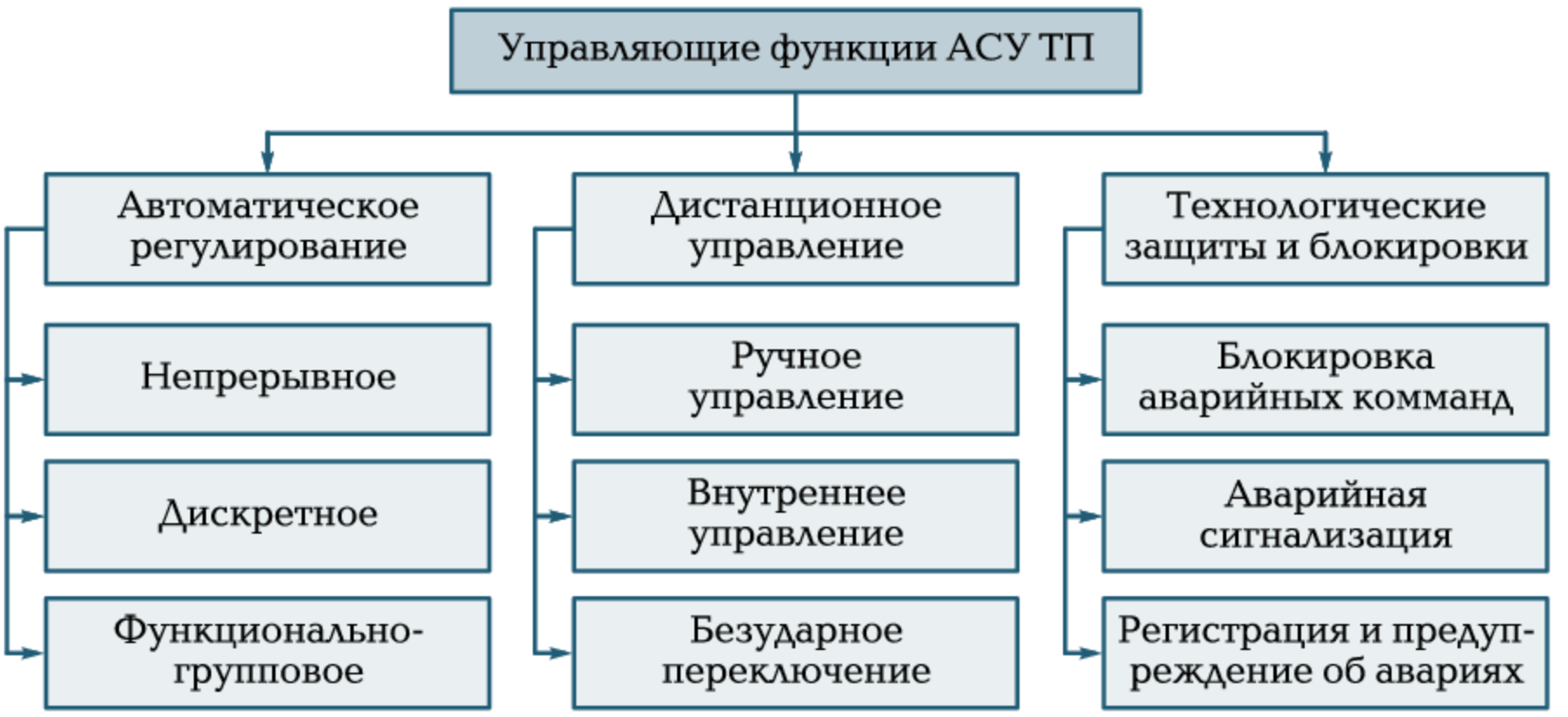


Рис. 1.2. Структура управляющих функций АСУ ТП

ров, а также для формирования управляющих команд разрешения на пуск, останов, блокировку, действие защиты, сигнализации и т.п.

Функционально-групповое управление (ФГУ) — более высокий уровень дискретного управления, при котором формирование дискретных управляющих воздействий осуществляется пошагово во времени с контролем состояния каждого шага. Функционально-групповое управление фиксирует определенную продолжительность каждого шага последовательности и выдает аварийный сигнал. В случае, если время истекло, а команда полностью не выполнена, последовательность приостанавливается до тех пор, пока оператор не изменит ее состояние.

Шаговые алгоритмы управления осуществляют следующие функции:

- контроль состояния оборудования;
- формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы;
- реализацию непосредственного управления исполнительными устройствами;
- управление величиной задания локальных контуров и состоянием автоматических регуляторов;
- формирование информации о ходе выполнения алгоритмов управления, а также причинах их невыполнения.

Информация для оператора о ходе работы шагового алгоритма состоит из номера и операции текущего шага, а также условий его выполнения.

Объектами ***дистанционного управления*** являются исполнительные механизмы станции: задвижки, регулирующие клапаны, двигатели и т. п. Помимо собственно *ручного управления* исполнительными механизмами станции оператор имеет возможность переводить режим работы запорной арматуры на *внешнее автоматическое управление* от логических схем функционально-группового управления или регуляторов более высокого уровня, включать/отключать блокировки и схемы автоматического ввода резерва. Для регулирующих клапанов можно устанавливать или изменять значения регулируемого параметра или степень открытия клапана. Переключение с дистанционного на автоматическое управление и обратно осуществляется безударно, т. е. без резких изменений управляющего сигнала.

Функция ***технологических защит и блокировок*** обеспечивает безаварийную реализацию управляющих сигналов, формируемых функциями автоматического регулирования и дистанционного управления. Данная функция позволяет блокировать управляющие сигналы, которые могут привести к аварийной ситуации на объекте управления. Например, не допускают передачу управляющего воздействия при одновременном формировании команд «вперед» и «назад» для электропривода технологического механизма или прерывают управляющий сигнал при достижении механизмом крайних положений. Кроме того, обеспечивается передача срабатывания сигналов защит на сигнализационные и оперативные дисплеи, включение звуковых и световых сигналов, передача этих сигналов во вспомогательные функции АСУ ТП для отображения.

Одновременно с основной функцией защит и блокировок выполняются функции регистрации аварийных ситуаций, анализ первопричины аварийной остановки оборудования, своевременное оповещение персонала о невыполняемых или невыполненных командах и действиях, которые могут привести к аварийной ситуации.

Информационные функции АСУ ТП. К информационным относят функции:

- сбора и первичной обработки информации;
- отображения информации;
- протоколирования и документирования.

Информационная функция ***сбора и первичной обработки информации*** является базовой функцией АСУ ТП. Кроме непосредственно опроса датчиков технологической информации производится контроль достоверности входной информации. По результатам контроля для каждого канала ввода формируется обобщенный

индекс недостоверности, позволяющий расшифровать причину сбоя в работе.

Далее вводимые сигналы подвергаются масштабированию, фильтрации, сглаживанию, линеаризации и корректировке с учетом используемого датчика, места его установки и условий работы.

Большинство информационных функций АСУ ТП реализуется непосредственно в модулях ввода сигналов современных промышленных контроллеров, и, как правило, особенности реализации алгоритмов скрыты от проектировщика системы. В некоторых случаях при программировании контроллеров указываются тип датчика, диапазон изменения его выходного сигнала и особенности эксплуатации. Все остальные действия по первичной обработке информации производятся встроенными алгоритмами.

Однако такой подход к первичной обработке информации вовсе не означает полный отказ от индивидуальной настройки функции первичной обработки информации. Разработчик может применять дополнительные действия по обработке сигналов, реализуя алгоритмы обработки непосредственно в управляющей программе контроллера.

Информационная функция ***отображения информации*** позволяет выводить информацию о технологическом процессе операторам-технологам на проекционные экраны коллективного пользования, мониторы рабочих мест и приборные панели пультов и щитов. На экраны мониторов операторов выводятся мнемосхемы оборудования, положение регулирующих органов, состояние коммутационной аппаратуры, запорной арматуры, регуляторов и механизмов, а также графики измерения параметров, гистограммы, таблицы текущих значений параметров, справочная информация, результаты расчетов прикладных задач.

Интерфейс оператора обеспечивает быстрый поиск необходимого объекта управления или информации и более широкий обзор общего состояния объекта. Ведется и отображается протокол событий, произошедших в системе за последний час, смену, сутки, месяц, год.

Другой вид графического представления состояния объектов — тренды, представляющие собой графики с расширенными возможностями просмотра и настройки. Для функциональных групп или узлов имеется возможность отображения параметров в виде горизонтальных и вертикальных гистограмм двух типов — с параметрами одинаковой и различной размерности.

Кроме графического отображения текущего значения параметра на гистограммах приводятся допустимые и аварийные значения

параметров. При выходе параметра за установки срабатывания цвет их линий меняется, например на желтый или красный.

Информационная функция ***протоколирования и документирования*** предназначена для формирования ведомостей и журналов для вывода на печать и экран, а также для протоколирования действий оператора-технолога, автоматики, защит и блокировок в процессе работы.

Вспомогательные функции АСУ ТП. К вспомогательным относят функции:

- технологической сигнализации;
- диагностики оборудования АСУ ТП.

Функция ***технологической сигнализации*** предназначена для визуального и звукового оповещения оперативного персонала о появлении технологических событий, требующих участия технологического персонала.

Информация о возникновении событий передается из управляющей функции АСУ ТП.

Вывод сигналов и сообщений технологической сигнализации осуществляется тремя способами:

1) только часть сигналов выводится на индивидуальные сигнальные табло, входящие в состав аварийно-резервной системы;

2) вся технологическая сигнализация выводится на сигнализационные дисплеи или табло, расположенные на мнемосхеме системы отображения коллективного пользования. Каждое появление сигнала сопровождается миганием и звуком;

3) аварийные сигналы появляются в строке сообщений дисплеев оперативных рабочих мест.

Технологическую сигнализацию подразделяют на *предупредительную* и *аварийную*, что определяет степень и уровень реагирования технологического персонала на событие.

Функция ***диагностики оборудования АСУ ТП*** позволяет осуществлять контроль работоспособности и отображения состояния комплекса технических и программных средств АСУ ТП. Неисправность определяют с точностью до аппаратного или программного модуля в темпе протекания технологического процесса. Использование этой функции в АСУ ТП обеспечивает:

- выявление сбоев/отказов контроллеров нижнего уровня и вычислительных средств верхнего уровня;
- контроль работоспособности модулей ввода/вывода аналоговых и дискретных сигналов;
- контроль работоспособности промышленной информационной сети передачи данных;

- контроль работоспособности программного обеспечения уровня контроллеров;
- формирование сообщений об обнаруженных отказах и выключениях оборудования АСУ ТП;
- представление полученной информации об отказах обслуживающему персоналу и оператору технологического процесса.

Информация о неисправностях выдается персоналу станции в виде сообщений и звуковой сигнализации, а также на специальных мнемосхемах комплекса технических средств АСУ ТП, где выделяются вышедшие из строя элементы. Информация об отказах автоматически заносится в ведомость регистрации отказов.

Уровни АСУ ТП. Современная АСУ ТП представляет собой иерархическую систему, в которой четко определены задачи отдельных уровней. В зависимости от выполняемых задач и места расположения оборудования различают три уровня АСУ ТП. Каждый уровень объединяет технические средства по функциональному признаку и выполняемым задачам (рис. 1.3).

***Нижний уровень* (*полевой* (*Field*), *уровень ввода/вывода* (I/O))** структуры является основой АСУ ТП и включает в себя средства, выполняющие функции получения информации и воздействия на процесс. Эти средства непосредственно взаимодействуют с объектом управления. Они обеспечивают информацией все вышерасположенные на схеме устройства и осуществляют передачу управляющих воздействий от любого из них на управляемый объект. Измерение параметра, не связанного со сложными инструментальными методиками, осуществляется с помощью датчиков (измерительных преобразователей). Для проведения измерений, требующих сложных инструментальных методик, применяют измерительные комплексы.

Кроме того, нижний уровень может включать модули распределенного ввода/вывода, которые располагаются непосредственно вблизи объекта управления и осуществляют функции «концентраторов» информации от измерительных преобразователей и управляющих воздействий на исполнительные устройства.

Устройства полевого уровня могут быть интеллектуальными, тогда обмен информацией с этими устройствами возможен непосредственно в цифровой форме по сети передачи данных.

***Средний уровень* (*локальный*, *уровень контроллеров*)** структуры АСУ ТП состоит из средств для локального контроля и автоматизации, предназначенных для построения одноконтурных систем контроля и регулирования простых объектов или автономного контроля и регулирования отдельных параметров сложных объ-

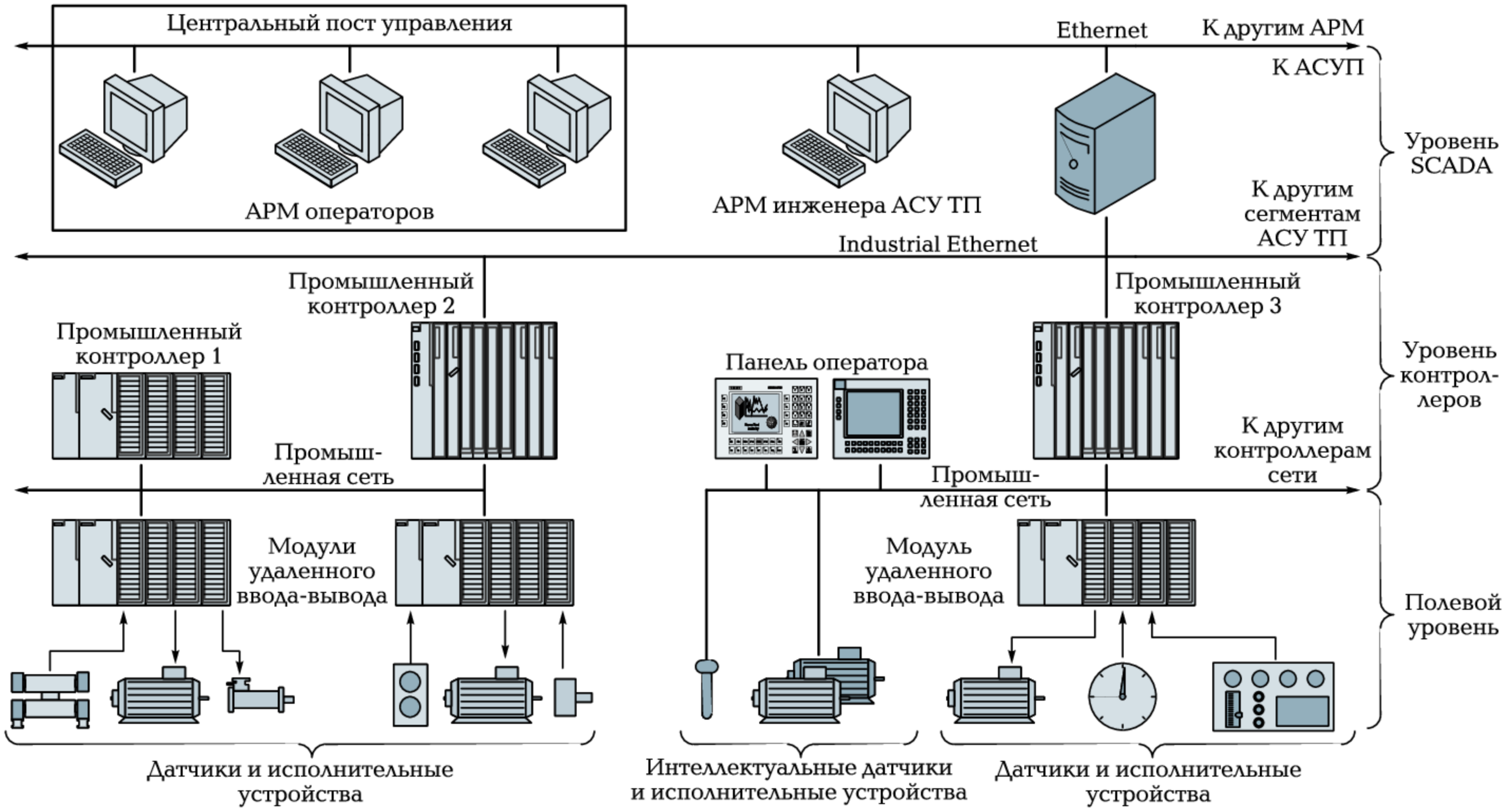


Рис. 1.3. Структура уровней современной АСУ ТП

ектов. На этом уровне реализуются функции непосредственного автоматического управления технологическими параметрами производственного процесса.

Локальный уровень современных АСУ ТП построен с использованием программируемых промышленных контроллеров, в которых формирование управляющих воздействий и управления исполнительными механизмами осуществляется по определенным алгоритмам (законам управления) при обработке информации о текущих величинах действительных и заданных значений технологических параметров, фиксируемых измерительными приборами.

Кроме того, технические средства локального уровня могут включать панели операторов, устройства программирования контроллеров, средства управления сетью передачи данных и шлюзы для соединения с другими сетями.

Аппаратно-программные технические средства локального уровня управления АСУ ТП должны соответствовать следующим основным требованиям:

- обеспечение работы всех локальных систем автоматического управления в режиме реального времени;
- высокая надежность (на уровне надежности технологического оборудования);
- возможность встраивания технических средств контроля и управления в основное технологическое оборудование;
- возможность нормального функционирования в реальных производственных условиях (загрязненный воздух, существенные перепады температур, сильные электрические поля, вибрационные и ударные нагрузки и т. п.).

На локальном уровне управления могут работать несколько контроллеров, представляющих собой распределенную систему управления и решающих общую задачу управления.

Передача данных между отдельными контроллерами осуществляется посредством локальной промышленной сети, которая выполняет следующие действия:

- передача данных между контроллерами, датчиками технологических параметров, измерительными устройствами, исполнительными механизмами и устройствами;
- диагностика технического состояния и работоспособности контрольно-регулирующей аппаратуры, установленной на автоматизированном технологическом производственном агрегате;
- питание датчиков и различных исполнительных устройств, удаленно распределенных по технологическому агрегату;

- передача информации между интеллектуальными датчиками и исполнительными механизмами;
- осуществление связи между контроллерами и устройствами АСУ ТП верхнего уровня.

Для передачи данных в промышленных сетях применяют кабельные линии, волоконно-оптические линии, радиомодемы. Часто промышленную сеть называют сетью полевого уровня, или полевой шиной (field bus). В качестве примера промышленной сети можно привести сеть полевого уровня «Profibus», разработанную компанией Siemens AG (Германия).

***Верхний уровень* (*уровень человеко-машинного интерфейса*)** включает в себя одну или несколько станций управления.

В качестве основного программно-инструментального средства, реализующего человеко-машинный интерфейс, используется система SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных), которая позволяет создавать как однопользовательские АРМ, так и сложные распределенные системы с несколькими серверами данных, имеющие собственную многоуровневую структуру, включая уровень представления данных в глобальных сетях и в сети Интернет.

Приведем основные задачи, решаемые системами SCADA (подробнее — см. гл. 4):

- обмен данными с устройствами уровня управления — промышленными контроллерами;
- предоставление удобного интерфейса взаимодействия оператора с системой управления для оперативного управления технологическим процессом;
- отображение (визуализация) информации о технологическом процессе на экране монитора в удобной и понятной форме (в виде мнемосхем, графиков, таблиц и т. д.);
- расчет и выбор законов и методов управления, настроек, уставок, соответствующих заданным показателям качества управления и текущим параметрам (или прогнозным) объекта управления;
- архивирование изменения параметров технологического процесса, сохранение всей технологической информации в базе данных;
- обнаружение и вывод на экран АРМ аварийных или критических ситуаций, возникающих в ходе управления технологическим процессом;
- формирование необходимых отчетов о протекании технологического процесса, состоянии оборудования, паспортов произведенной продукции и т. п.

Вычислительные средства верхнего уровня АСУ ТП обычно объединены локальной информационной сетью стандарта Ethernet и могут иметь выход в глобальные сети, например, в глобальную сеть предприятия или сеть Интернет. Информационная сеть верхнего уровня управления АСУ ТП полностью независима от сети контроллеров для исключения возможности взаимовлияния. Передача данных осуществляется через специальные устройства — шлюзы, программное обеспечение которых позволяет автоматически реконфигурировать структуру сети и каналы передачи данных при отказе отдельных элементов АСУ ТП.

Глава 2

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

2.1. ЗНАЧИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Важнейшим фактором экономического развития является использование современных достижений автоматизации в промышленном производстве.

Несмотря на непрерывное развитие систем автоматического контроля и управления, можно выделить следующие основные этапы этого процесса:

1) оснащение технологических производственных агрегатов современными системами контроля параметров технологического процесса и необходимым информационным обеспечением;

2) использование дистанционного, автоматического и супервизорного управления исполнительными механизмами, управляющими изменением основных топливно-энергетических ресурсов;

3) автоматическая стабилизация (регулирование) основных значимых параметров технологического процесса (температуры, расхода, давления и т. д.);

4) применение комплексных систем автоматического управления, состоящих из нескольких локальных стабилизирующих контуров управления, в целях обеспечения оптимального критерия управления технологическими агрегатами или процессами.

Интенсивное использование систем автоматического управления имеет большое социальное значение. Автоматизация производственных процессов позволяет снизить издержки производства, увеличить производительность труда и за счет этого повысить экономическую эффективность производства даже при сокращении стоимости единицы готовой продукции. Это способствует быстрой окупаемости затрат на автоматизацию

и позволяет производить достаточное количество конкурентоспособной продукции.

Использование автоматизированных систем является одним из основных направлений технического прогресса и развития производительных сил общества. Если ранее (до внедрения САУ) технологу требовался длительный срок для овладения приемами квалифицированного управления производственным процессом, то при использовании современных автоматизированных систем контроля и управления сроки приобретения необходимой квалификации многократно сократились и технологи получили возможность работать в более комфортных условиях, занимаясь квалифицированным трудом. Но при этом повысились требования к уровню образования технологического персонала.

Кроме социального значения автоматизации не менее значима оценка экономической эффективности САУ. В условиях современного промышленного производства при относительно небольшой численности технологического персонала, обслуживающего основные агрегаты, внедрение САУ не приводит к высвобождению рабочих мест, а наоборот, часто требует привлечения дополнительного количества квалифицированных специалистов для обслуживания систем автоматического контроля и управления. Увеличение производительности, улучшение организации работы технологических агрегатов и повышение качества выпускаемой продукции быстро компенсирует повышение затрат на автоматизацию.

Автоматизация вспомогательных операций (контроль, отделка, маркировка, упаковка и т.д.), требующих использования многочисленного персонала, позволяет отказаться от использования труда низкоквалифицированных работников, получить значительный экономический эффект, создать условия повышения уровня оплаты труда.

Критерием оценки работы систем автоматического управления служит срок окупаемости затрат на автоматизацию производственного процесса. Повышение производительности труда при автоматизации технологических агрегатов эквивалентно строительству новых, поэтому создание и внедрение систем автоматического контроля и управления должно проводиться с учетом экономической целесообразности и обеспечения технологически обоснованного уровня управления производственным процессом. Рационализация автоматического управления производственными и технологическими процессами должна обязательно учитывать все экономические и особенно социальные аспекты.

2.2. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Любой технологический процесс сопровождается воздействием различных возмущающих факторов, нарушающих его нормальное протекание и вызывающих отклонение контролируемых параметров от заданных значений, что приводит к снижению качества конечного продукта. Применение систем автоматического регулирования позволяет стабилизировать параметры процесса. В качестве примера рассмотрим процесс управления нагревом воды в бойлере, при котором температура воды на выходе из бойлера должна оставаться постоянной независимо от величины потребления (рис. 2.1).

Принцип работы бойлера заключается в следующем. Пар и холодная вода поступают в теплообменник, где происходит нагрев воды за счет тепла пара. Для контроля температуры нагретой воды на выходе из теплообменника установлен термометр. При ручном управлении температура воды визуально контролируется оператором, который принимает решение о регулировании расхода пара (рис. 2.1, *а*). При увеличении потребления горячей воды оператор, воздействуя на клапан, увеличивает подачу пара так, чтобы температура воды на выходе из теплообменника была равна заданной, а при уменьшении потребления воды — уменьшает подачу пара. Операция, проводимая оператором, называется ***управлением технологическим процессом***.

При использовании систем автоматического регулирования действия по управлению технологическим процессом производят-

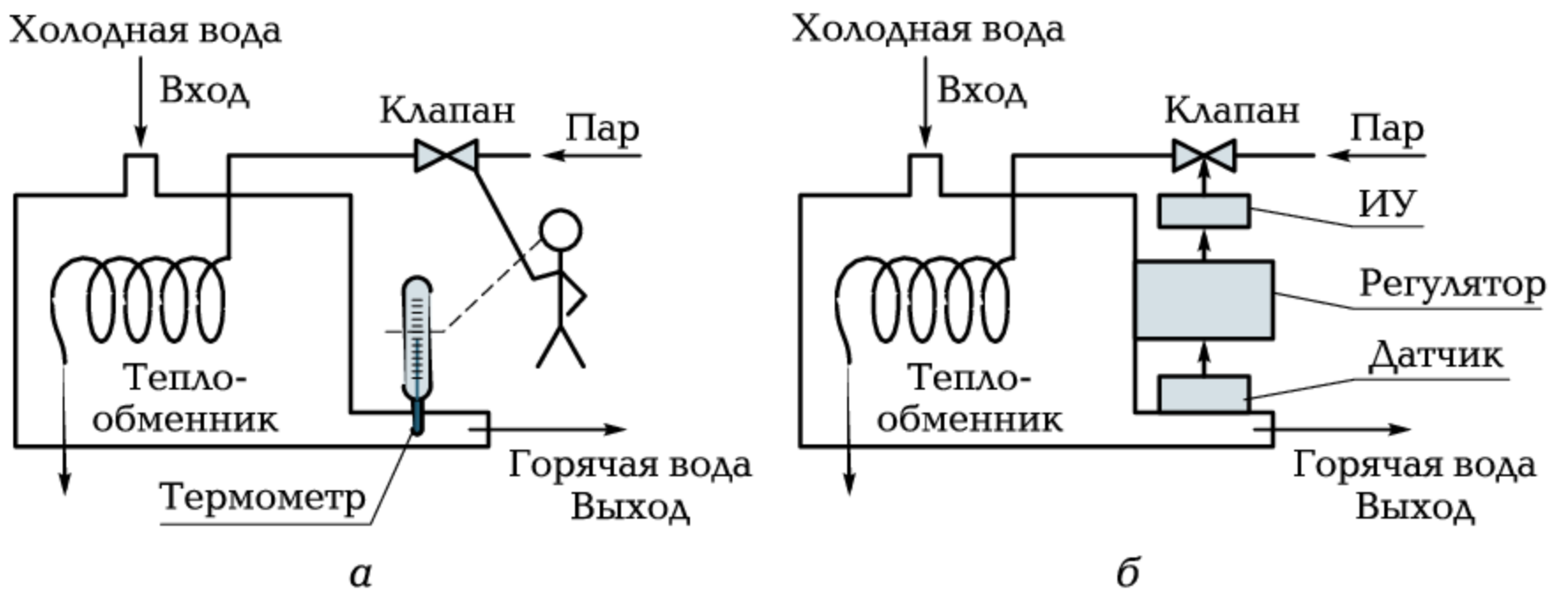


Рис. 2.1. Процесс управления нагревом воды в бойлере:
а — ручное управление; *б* — автоматическое управление

ся устройствами автоматического регулирования — регуляторами (рис. 2.1, *б*). На регулятор подается величина параметра технологического процесса — температура воды на выходе из теплообменника. Этот сигнал сравнивается с заданным значением и в зависимости от величины рассогласования между заданным и текущим значениями выходного параметра, регулятор формирует управляющий сигнал на открытие или закрытие клапана подачи пара. Для того чтобы преобразовать параметр температуры воды на выходе из теплообменника в сигнал, с которым может работать регулятор, используется измерительный преобразователь — датчик температуры, который преобразует сигнал температуры в электрический сигнал, передаваемый регулятору. Регулятор формирует управляющий сигнал, который поступает на исполнительное устройство (ИУ). Привод исполнительного устройства, соединенный с клапаном, изменяет расход пара.

На рис. 2.2 показана структурная схема процесса управления температурой воды на выходе из теплообменника.

На структурной схеме изображен контур управления, который включает в себя ***объект управления*** (ОУ) — автоматизируемый технологический процесс нагрева воды. Объект управления имеет входы и выходы. В приведенном примере входом является положение клапана подачи пара, а выходом — температура воды на выходе из теплообменника. Управление величиной входного сигнала ОУ осуществляется путем реализации ***управляющих воздействий*** от регулятора исполнительным устройством. Контроль выходного сигнала — ***регулируемого параметра***, производится

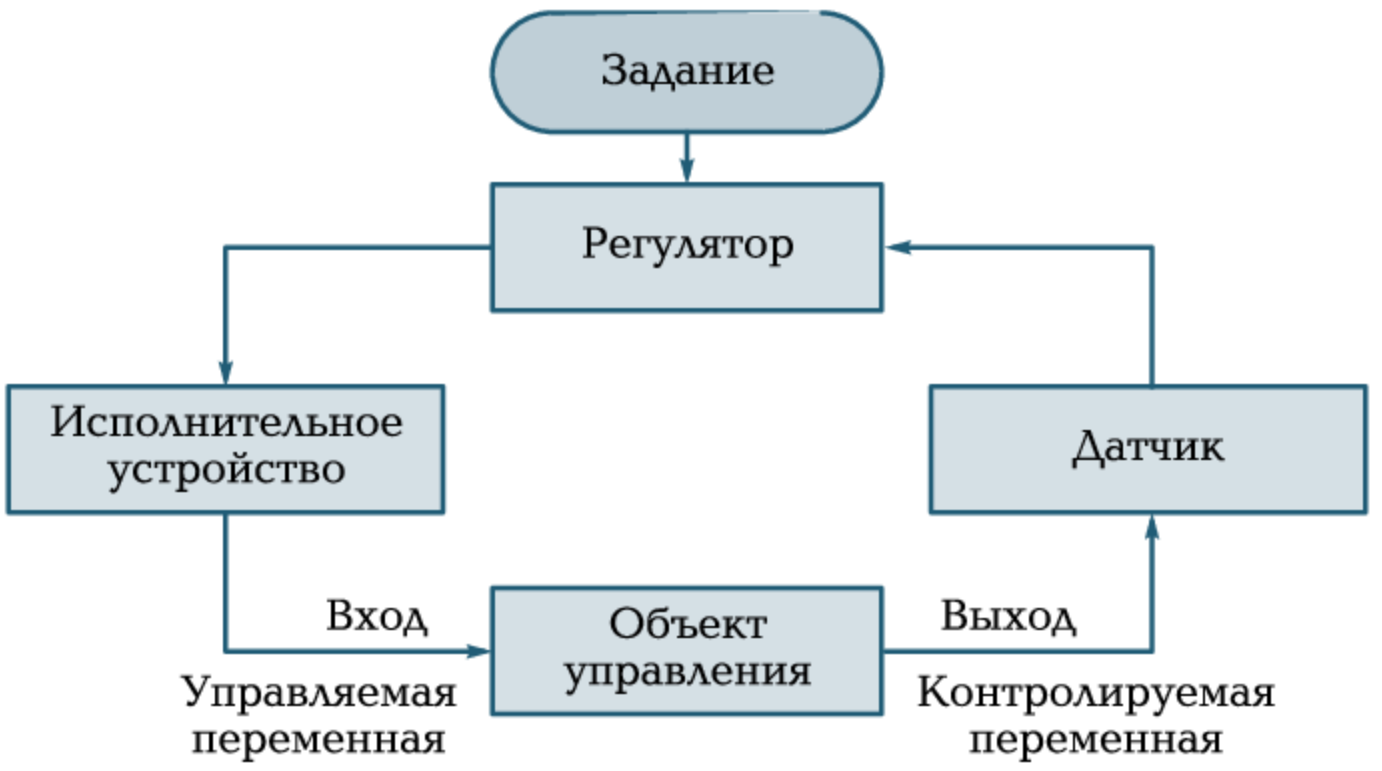


Рис. 2.2. Структурная схема процесса автоматического управления температурой воды на выходе из теплообменника

датчиком, который преобразует физический сигнал технологического процесса (температуры) в электрический сигнал для передачи на регулятор.

Входные и выходные сигналы объекта управления называются ***переменными процесса***: входной сигнал ОУ — управляемая переменная, выходной — контролируемая переменная.

Число входов и выходов ОУ не обязательно ограничивается одной переменной. Для сложных технологических объектов управления число входных и выходных переменных может достигать нескольких десятков и даже сотен.

2.3. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Совокупность объекта управления и технических устройств, предназначенных для управления, называют системой автоматического регулирования (управления). В зависимости от различных признаков и свойств, а также вида управляемого объекта принято классифицировать САР по принципам их работы.

САР классифицируют по различным основаниям (рис. 2.3):

- по виду регулируемого параметра — давления, температуры, уровня, влажности и т. д. Этот вид классификации САР используется для указания регулируемого параметра технологического процесса в общей структуре АСУ ТП (например, на рис. 2.1, *б* приведена САР температуры воды на выходе из теплообменника);
- принципу действия — непрерывного и дискретного действия. В *непрерывных* САР осуществляется постоянная функциональная связь между элементами, входящими в структуру САР, а непрерывному изменению управляющего воздействия соответствует непрерывное изменение во времени регулируемого параметра (например, приведенная на рис. 2.2 структурная схема). В *дискретных* САР либо одна переменная процесса управления изменяется дискретно, либо происходят дискретные изменения сигналов хотя бы в одном из элементов системы;
- характеру воздействия регулятора на объект регулирования — стабилизирующие, следящие, программные и оптимизирующие и САР.

  В *стабилизирующих* системах заданное значение регулируемой величины устанавливается и остается неизменным в процессе нормального хода процесса.

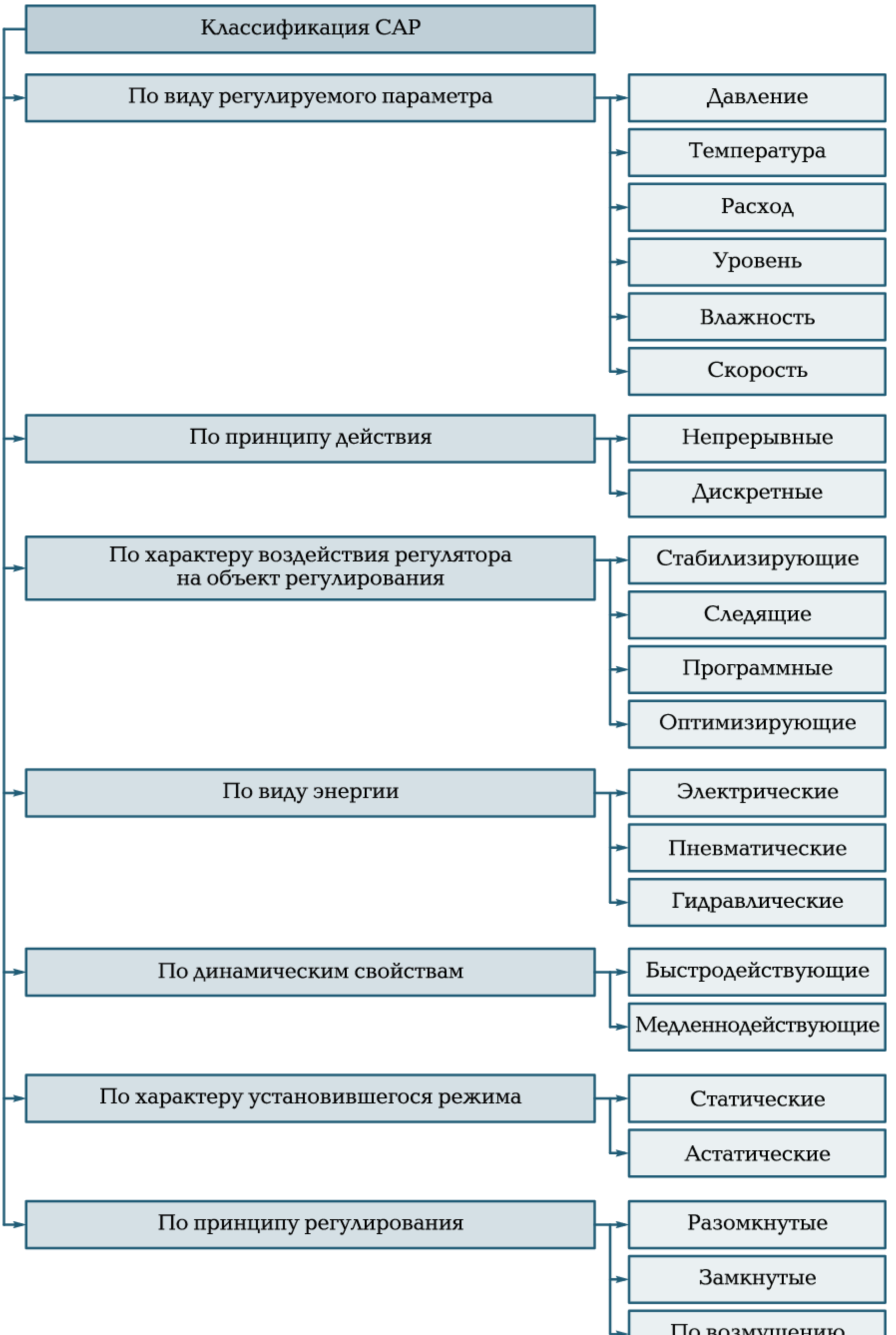


Рис. 2.3. Классификация САР

В *следящих* системах задание меняется в зависимости от изменения какой-либо другой управляемой величины или переменной процесса.
В системах *программного регулирования* задание в системе изменяется во времени по заранее определенному графику.
В *оптимизирующих* системах значение регулируемой величины не задается, а регулятор самостоятельно формирует управляющие воздействия для осуществления поиска максимального или минимального значения некоторого заданного критерия (цели управления);

- виду энергии, используемой в регуляторе и исполнительном механизме, — *электрические*, *пневматические* и *гидравлические*. В настоящее время подавляющее большинство САР, используемых для автоматизации процессов промышленного производства, работают на электрической энергии. Гидравлические и пневматические САР распространены при управлении мехатронными системами различных типов, работе в экстремальных условиях эксплуатации оборудования, а также там, где требуются значительные усилия для воздействия на рабочие органы объекта управления при достаточно компактном размещении элементов;
- динамическим свойствам — *быстродействующие* и *медленнодействующие*. Несмотря на то что четкой границы между этими типами САР не существует, на практике большинство производителей технических средств считают быстродействующими САР такие, у которых реакция на изменение входного воздействия составляет менее 30…50 мс. Как правило, практически для всех технологических процессов промышленного производства достаточно медленнодействующих САР. Быстродействующие САР применяют для управления приводами, в системах технического зрения, системах ориентации мобильных систем и т.д.;
- характеру установившегося режима — статические и астатические.
  В *астатических* системах регулируемая величина после окончания переходного процесса точно равна заданному значению.
  В *статических* системах после окончания переходного процесса возникает разность между заданным и установившимся значениями регулируемой величины — статическая ошибка.
  Одна и та же система автоматического регулирования может быть статической по возмущающему воздействию и астатической по управляющему воздействию, и наоборот;

- принципу регулирования — разомкнутые, замкнутые и по возмущению.

Разомкнутый принцип регулирования (по задающему воздействию) заключается в том, что управляющее воздействие $U(\tau)$ вырабатывается на основе характеристик объекта и цели управления. В таких системах управляющее устройство не получает информацию о значении управляемой величины $y(\tau)$ и величине внешних возмущений Z.

Управление, реализующее данный принцип, называется управлением по задающему воздействию. Система, построенная по этому принципу, является разомкнутой, или незамкнутой. Структурная схема разомкнутой системы представлена на рис. 2.4, *а*.

Например, необходимо обеспечить поддержание во времени выходной величины $y(\tau)$ в соответствии с законом изменения, формируемым задающим устройством (ЗУ). Для этого на вход ОУ подключается управляющее устройство (регулятор), на вход которого воздействуют величиной задания $g(\tau)$ — управляющим сигналом. Структурная схема имеет вид разомкнутой цепочки, отсюда — и название принципа.

Как видно из схемы, ни возмущение Z, ни выходная величина $y(\tau)$ никак не воздействуют на величину управляющего сигнала $g(\tau)$.

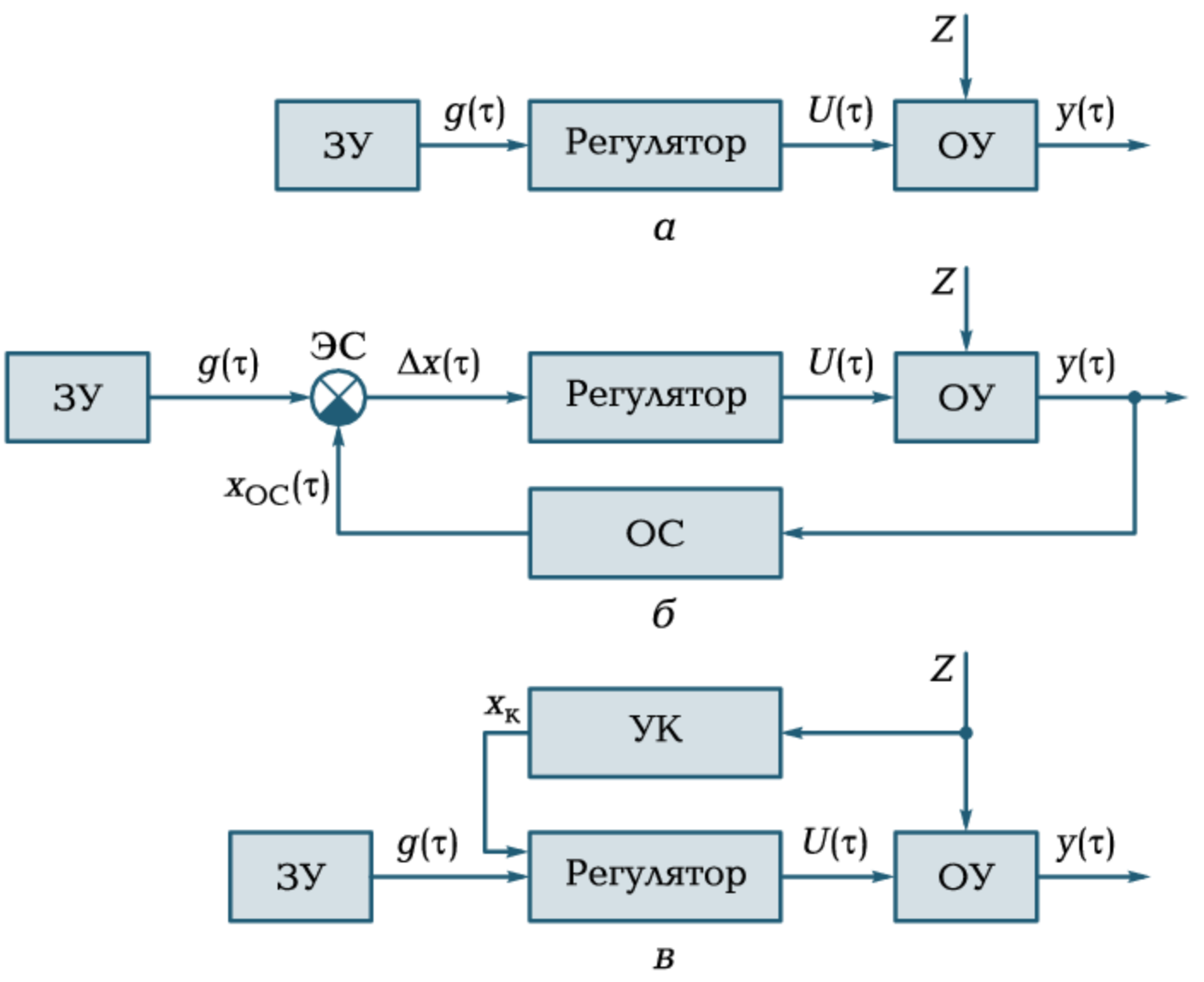


Рис. 2.4. Структурные схемы САР:

а — разомкнутая; *б* — замкнутая; *в* — с регулированием по возмущению

По этой причине любые отклонения величины $y(\tau)$ предполагаемого закона изменения, заложенного в алгоритм функционирования системы, этой системой не устраняются. Точность регулирования в разомкнутых системах (близость $y(\tau)$ к $g(\tau)$ в процессе регулирования) обеспечивается только стабильностью характеристик звеньев, образующих объект регулирования и управляющее устройство (регулятор). Примером систем, работающих по разомкнутому принципу, является торговый автомат, выдающий какие-либо предметы (например, билеты, шоколад) при опускании в него определенной комбинации монет.

Замкнутый принцип регулирования (*по отклонению*) является наиболее распространенным и универсальным способом регулирования. Функциональная схема типовой системы управления по отклонению приведена на рис. 2.4, *б*. Кроме того, рассмотренный ранее пример (см. рис. 2.1 и 2.2) также реализует принцип регулирования по отклонению.

В основу принципа положено определение величины ошибки регулирования (рассогласования) — разницы между заданным (желаемым) сигналом величины задания $g(\tau)$ и действительной величиной регулируемого параметра $x_{\text{ОС}}(\tau)$ в элементе сравнения (ЭС):

$$\Delta x(\tau) = g(\tau) - x_{\text{ОС}}(\tau).$$

Сигнал управления $U(\tau)$ формируется как функция этой величины ошибки.

Система имеет вид замкнутого контура, в котором передача воздействий происходит в направлении, указанном стрелками. Канал, по которому передается величина регулируемого параметра для расчета рассогласования, называется каналом *обратной связи* (ОС).

Возможность получения высокой точности регулирования способствовала широкому распространению замкнутых систем регулирования.

Регулирование по возмущению (*компенсация возмущения*) применяют в случае, когда величину возмущения Z, которая вызывает отклонение регулируемой величины $y(\tau)$ от заданного значения $g(\tau)$, удается измерить, после чего по результатам этих измерений так скорректировать управляющий сигнал регулятора, чтобы ошибка регулирования стала минимальной.

С этой целью организуется дополнительный канал передачи возмущения Z (рис. 2.4, *в*) на измерительное устройство — узел компенсации (УК), причем таким образом, чтобы действие компенсирующего сигнала $x_{\text{к}}$ было противоположно действию возмущения Z. В системах с регулированием по возмущению ошибка регули-

рования, вызванная только измеренным возмущением, эффективно устраняется. Другие неучтенные возмущения при этом никак не устраняются. Рассмотренный принцип имеет достаточно высокое быстродействие и может эффективно применятся в тех случаях, когда измерение возмущений возможно стандартными устройствами и не представляет больших технических трудностей.

2.4. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Производственные и технологические процессы представляют собой динамические (изменяющиеся во времени) процессы преобразования исходных материалов или энергетических ресурсов в конечную продукцию, имеющую потребительскую стоимость.

Изменение технологических параметров любого производственного процесса всегда можно определить с помощью одной или нескольких переменных величин процесса, изменяющихся или во времени, или в пространстве. Чем сложнее технологический управляемый процесс, тем больше необходимо использовать различных величин для объективного представления процесса.

Понятия и определения теории управления. Важнейшими понятиями теории автоматического управления являются объект управления, управляющее устройство (регулятор), управляющие и возмущающие воздействия.

Основной целью и главной задачей автоматического управления любым процессом является принятие и реализация таких решений, которые обеспечивают в каждом конкретном случае наиболее эффективное достижение поставленной цели. Объектами автоматического управления могут быть технологические процессы в отдельных агрегатах, производственный процесс в цехе или на всем предприятии, живые организмы и т. д.

К *объекту управления* относят технологическое оборудование, производственный процесс, группу механизмов и машин и т. д. Внесение каких-либо изменений в объект управления, как правило, невозможно, или представляет значительные трудности. Поэтому ОУ является «неизменяемой частью» системы.

Взаимные связи между отдельными элементами САУ обычно представляются в виде структурных схем, в которых элементы показаны прямоугольниками, а связи между элементами — соединительными линиями со стрелками, указывающими направление передачи различных информационных и управляющих сигналов.

Структурная схема — это совокупность элементарных звеньев и связей между ними, один из видов графической модели. Структурная схема предназначена для отражения общей структуры устройства и связей между основными блоками, а также для определения общего функционала устройства и взаимодействия его частей.

Состояние и поведение объекта управления во времени может быть представлено системой дифференциальных уравнений, которые описывают его природу и образуют математическую модель объекта. Также свойства объекта управления могут быть описаны статическими и динамическими ***характеристиками***.

В общем виде объект управления можно представить в виде структурной схемы (рис. 2.5), на которой указаны регулируемые параметры объекта y_1, ..., y_n, возмущающие воздействия Z_1, ..., Z_k, управляющие воздействия U_1, ..., U_m, а также промежуточные (внутренние) переменные состояния объекта γ_1, ..., γ_r.

Регулируемые параметры характеризуют работу объекта управления и определяются технологическим процессом или рабочим механизмом.

Управляющие воздействия подаются на вход объекта управления и формируются таким образом, чтобы регулируемые параметры изменялись в соответствии с технологическим процессом или требованием работы механизмов.

Возмущающие воздействия действуют на объект управления случайным образом и в большинстве случаев не контролируются. Тем не менее, их действие вызывает отклонение выходных переменных от заданных значений.

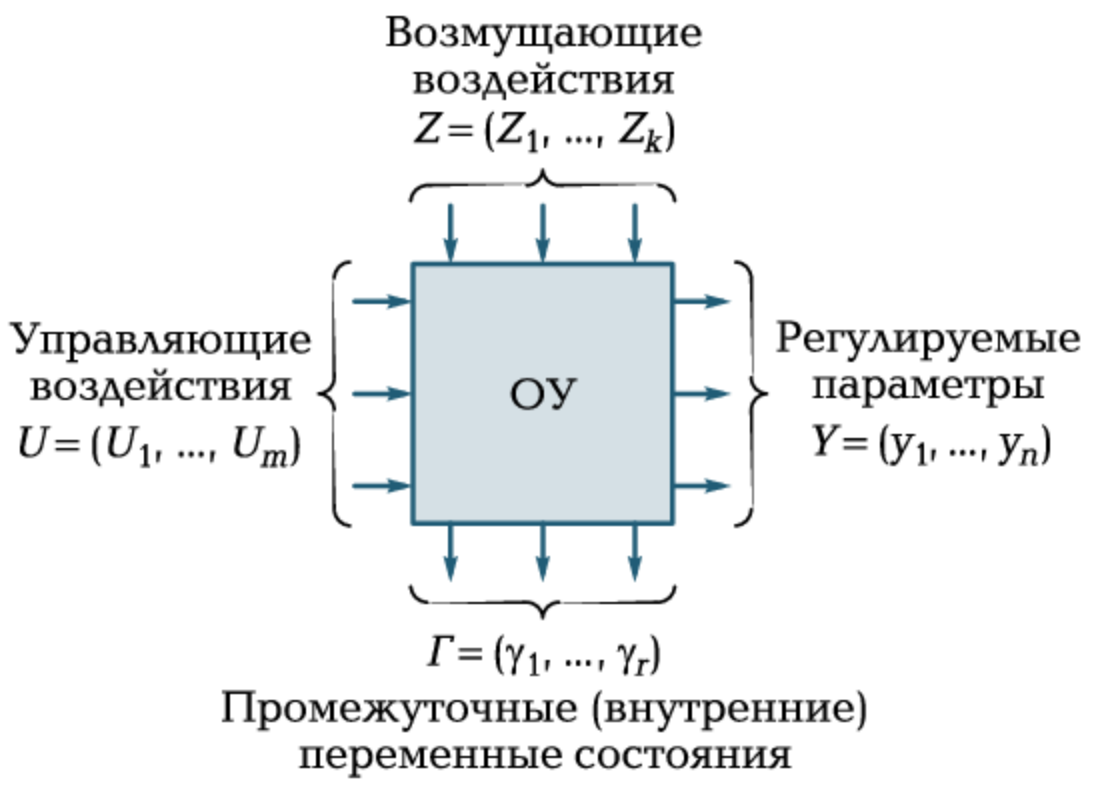


Рис. 2.5. Общая структура объекта управления

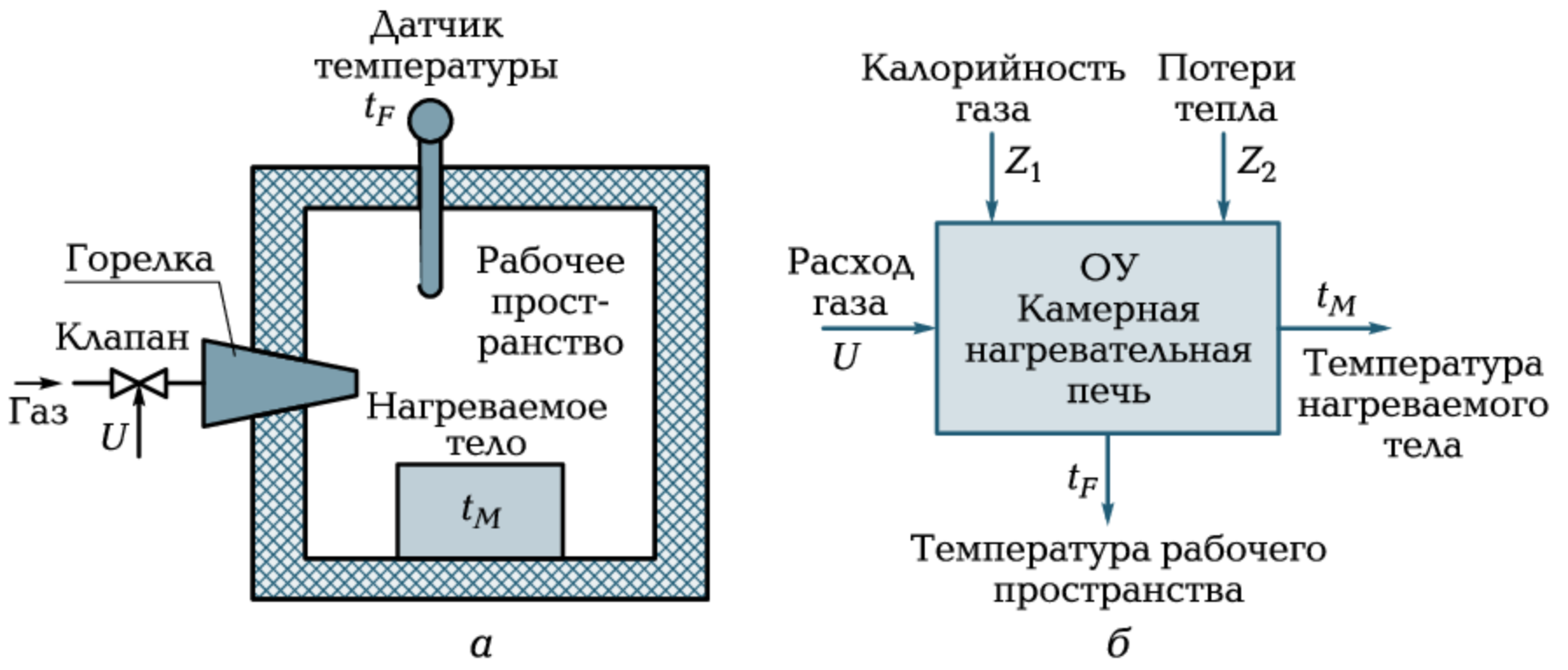


Рис. 2.6. Пример объекта управления:

а — общий вид камерной нагревательной печи; *б* — структурная схема

Промежуточные (*внутренние*) *переменные* прямо не влияют на ход технологического процесса, однако играют значительную роль в нормальном функционировании объекта управления.

Рассмотрим в качестве примера объекта управления работу камерной нагревательной печи, отапливаемой газообразным топливом (рис. 2.6, *а*).

Регулируемым параметром (рис. 2.6, *б*) является основной параметр технологического процесса нагрева — температура нагреваемого тела t_M, для изменения которой требуется регулировать подачу газа в печь (расход газа). Поэтому в качестве управляющего воздействия выберем степень открытия (угол поворота) клапана газа U.

Возмущающими воздействиями в этом объекте могут быть калорийность отопительного газа Z_1 и величина потерь тепла через кладку печи, смотровые отверстия и загрузочные окна Z_2. Параметры возмущающих воздействий могут меняться произвольным образом и в данном технологическом процессе не контролируются.

Промежуточной переменной является температура рабочего пространства печи t_F, измеряемая датчиком температуры. Датчик позволяет следить за температурой рабочего пространства печи.

Контур регулирования можно представить в виде комбинации соединения элементарных звеньев различного типа. Для того чтобы правильно структурно представить, создать и физически обоснованно настроить (наладить) соответствующий контур управления технологическим параметром, необходимо знать статические и динамические характеристики, а также динамические параметры каждого звена контура управления.

Под ***элементарным звеном*** понимается часть объекта или системы управления, которое реализует элементарную функцию. Элементарные звенья изображаются прямоугольниками, а связи между ними — сплошными линиями со стрелками, показывающими направление действия звена. Нередко в поле прямоугольника вписывают математическое выражение закона преобразования сигнала в звене или его графическое обозначение.

Отдельные группы связанных элементарных звеньев могут составлять ***элементы системы автоматизации*** (их также изображают в виде прямоугольников), выполняющие определенные функции, конкретная реализация которых может не раскрываться. Например, представленные на рис. 2.4 структурные схемы систем регулирования составлены из элементов, выполняющих разные функции (регулятор, исполнительное устройство и т. д.), и несут информацию об общем способе реализации систем регулирования различных типов, при этом конкретная реализация функций каждого элемента не раскрывается.

Как правило, в соответствии с выполняемыми функциями элементы САР подразделяют на три группы:

- ***измерительные*** — представляют собой различные типы элементов получения информации о контролируемом или регулируемом параметре (датчики, измерительные комплексы и т. д.);
- ***преобразовательные*** — служат для преобразования информационного сигнала, в соответствии с какой-либо функцией или алгоритмом (регуляторы, корректирующие устройства, задающие устройства и т. д.);
- ***исполнительные*** — включают в себя комплекс исполнительных устройств, непосредственно воздействующих на регулирующие органы объекта управления или осуществляющих передачу управляющих сигналов.

Элементы любой из трех групп имеют входы и выходы. На вход поступает информация, форма которой преобразуется в другую, необходимую для дальнейшего движения или воздействия. Сами элементы могут объединяться в более крупные образования, вплоть до систем автоматического регулирования или управления. Вне зависимости от степени объединения у любого элемента обязательно должны быть хотя бы один вход и один выход.

Элементарные звенья, элементы системы управления, а также системы управления могут находиться в одном из двух режимов:

- ***установившемся (статическом)***, при котором входные и выходные сигналы элемента, а также все внутренние звенья остаются постоянными во времени;

- ***переходном* (*динамическом*)**, при котором входной и выходной (или один из сигналов внутренних звеньев) сигналы изменяются во времени.

Вид режима, в котором находится элемент (система), определяет вид математического описания и род используемых математических уравнений.

Установившийся режим описывается уравнениями статики, представляющими собой алгебраические уравнения, переходный режим — уравнениями динамики, которые являются дифференциальными уравнениями.

Статические характеристики. Зависимость выходной (регулируемой) величины $y(\tau)$ от входной (регулирующее воздействие) $x(\tau)$ в установившемся режиме называется статической характеристикой элемента. Установившимся режимом называют такое состояние объекта, при котором все переходные процессы в объекте закончены.

В общем виде математическое описание статической характеристики для одного выходного сигнала может быть представлено следующим образом:

$$y(\tau) = f(x_1, x_2, \ldots, x_n),$$

где x_1, x_2, ..., x_n — входные сигналы.

По виду статических характеристик элементы САР подразделяют на *линейные*, *нелинейные* и *релейные*. Если статическая характеристика дифференцируема (имеет производную) во всей области определения, то такая характеристика является непрерывной. В релейных элементах САР статические характеристики имеют разрывы (как правило, первого рода). Возможный вид статических характеристик представлен на рис. 2.7, *а*...*е*.

Для линейных статических характеристик (рис. 2.7, *а*) во всем диапазоне изменения входного сигнала выполняется условие

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = K = \text{const};$$

для нелинейных статических характеристик (рис. 2.7, *б*, *в*) — условие

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = f(x). \qquad (2.1)$$

Среди нелинейных статических характеристик элементов САР могут быть характеристики, у которых одному значению выходного

сигнала y соответствуют два значения x_1 и x_2 и функциональная зависимость (2.1) меняет знак. Такие характеристики относятся к экстремальным статическим характеристикам.

На рис. 2.7, *г*...*е* приведены примеры релейных статических характеристик. Выходная величина y может принимать только определенные значения. Кроме того, релейная характеристика может не иметь гистерезиса (см. рис. 2.7, *г*) или иметь гистерезис (см. рис. 2.7, *g*, *е*), т. е. величина выходного сигнала звена САР

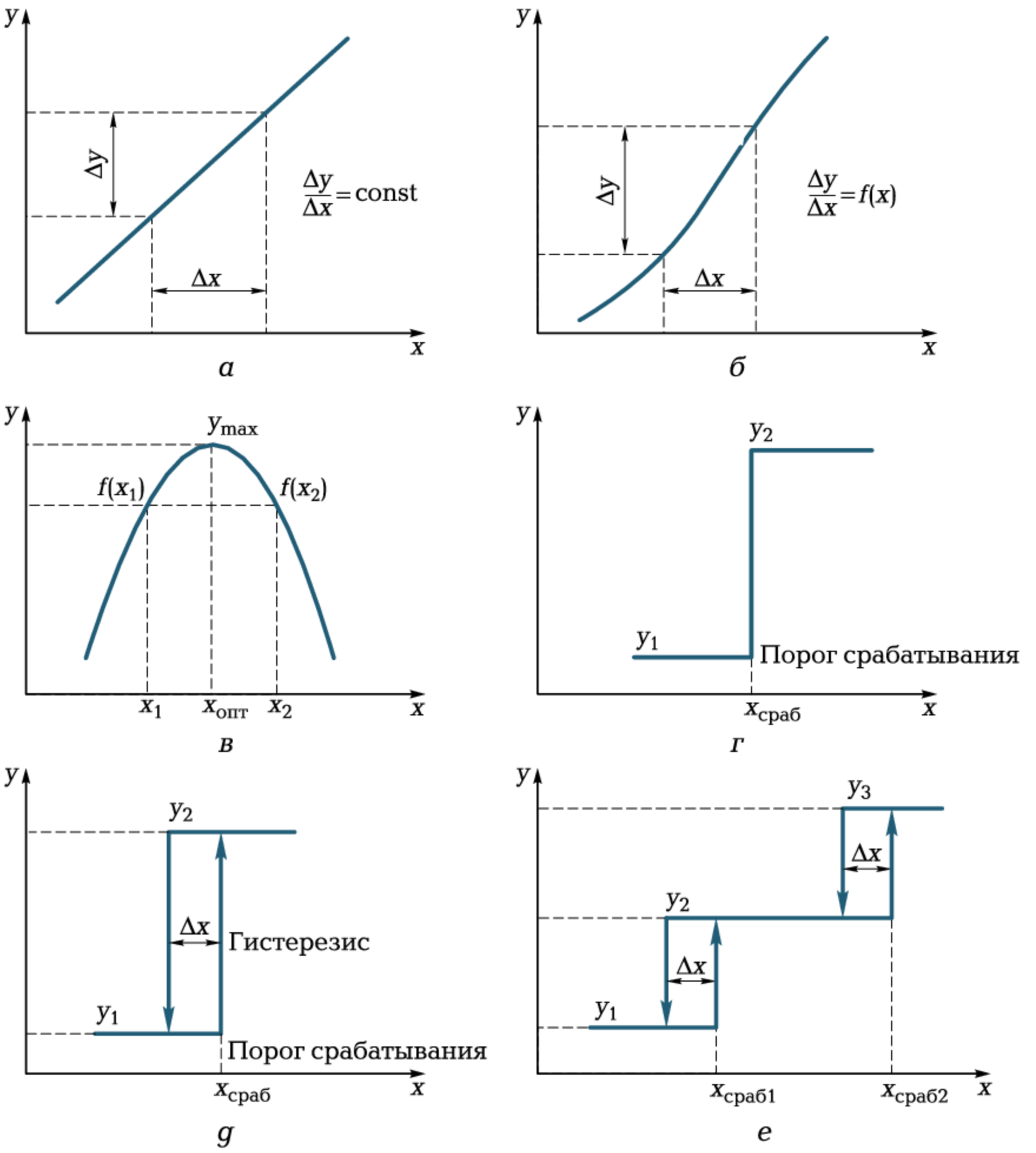


Рис. 2.7. Виды статических характеристик элементов САР:
а — линейная; *б*, *в* — нелинейные; *г*...*е* — релейные

с релейной статической характеристикой и гистерезисом зависит не только от текущего значения входного сигнала, но и от истории его изменения. Стрелками на статической характеристике показано направление изменения входной величины сигнала x.

Статические характеристики позволяют оценить, во-первых, границы управляемости ОУ, т. е. интервал, в пределах которого ($y_{min} \dots y_{max}$) можно изменять регулируемый параметр x от x_{min} до x_{max}, а во-вторых, линейность системы, в состав которой входят элементы САР.

В сложных системах автоматического управления используются различным способом соединенные элементы САР, каждый из которых имеет свою статическую характеристику.

Существует три способа соединения элементов:

- последовательное;
- параллельное;
- противовключением (обратной связи).

При последовательном соединении элементов выходная величина предыдущего звена является входной величиной для последующего. Примером такого соединения могут служить характеристики (рис. 2.8, *а*) регулирующего органа и объекта управления.

Максимальное число последовательно соединяемых звеньев ограничивается надежностью разрабатываемого контура управле-

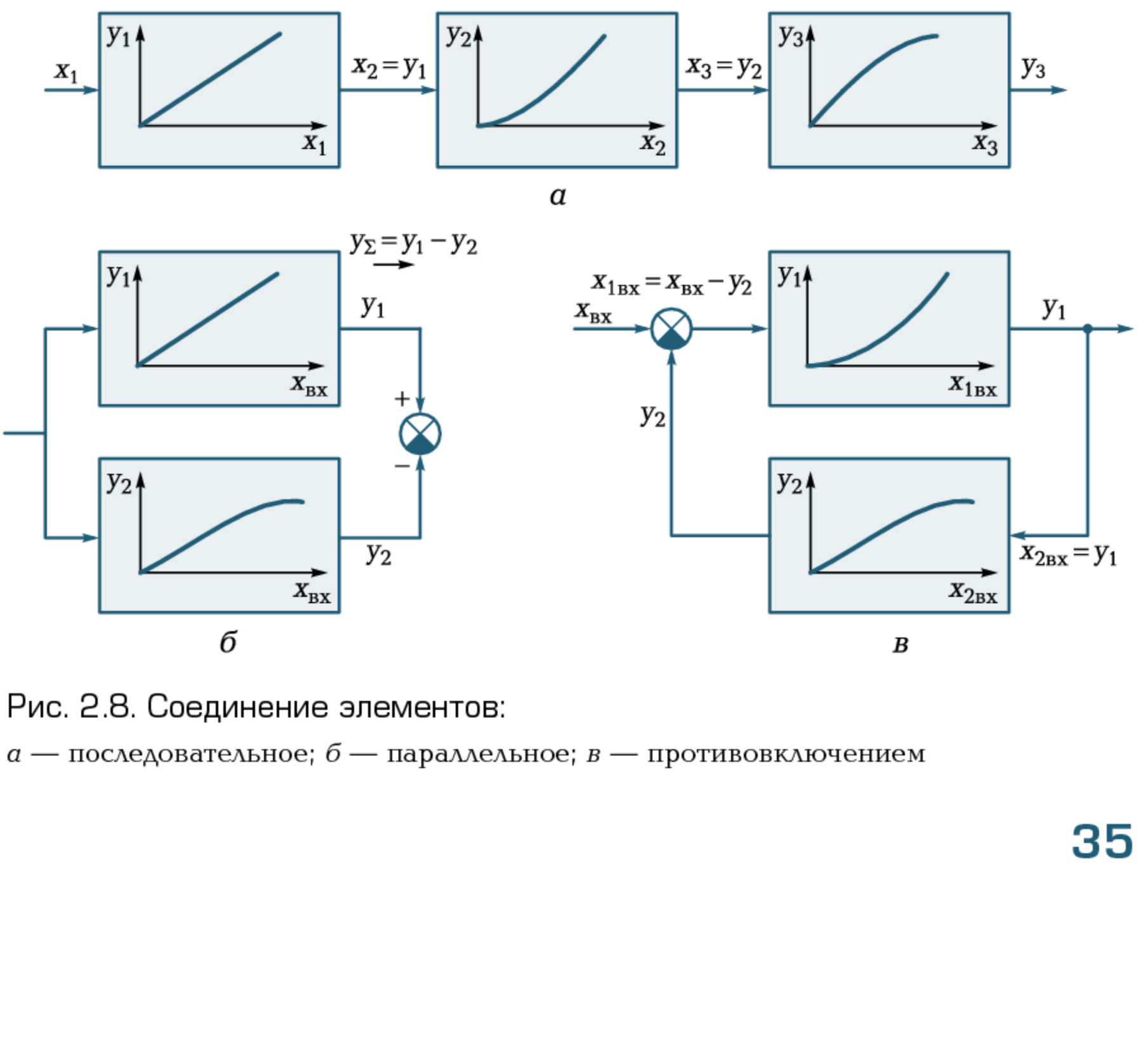


Рис. 2.8. Соединение элементов:

а — последовательное; *б* — параллельное; *в* — противовключением

ния, т. е. свойством контура управления действовать безотказно. С увеличением числа элементов надежность снижается.

При параллельном соединении элементов контура управления входная величина одновременно подается на вход всех элементов, а выходные параметры каждого элемента алгебраически (с учетом знака) суммируются.

Пример параллельного соединения элементов и определения результирующей статической характеристики представлен на рис. 2.8, *б*. Надежность системы, состоящей из параллельно соединенных локальных элементов (при дублировании, если имеется два элемента), увеличивается.

При противовключении, или охвате элемента обратной связью, выходная величина элемента, включенного в обратную связь, воздействует на входную величину первого (основного) элемента.

Если в результате воздействия обратной связи входная величина основного объекта увеличивается, то такую обратную связь называют положительной обратной связью (ПОС), если уменьшается, то — отрицательной (ООС). В системах автоматического управления в основном используется ООС.

Пример структурной схемы звена, охваченного отрицательной обратной связью, и построение результирующей статической характеристики приведен на рис. 2.8, *в*.

Необходимо отметить еще одно очень важное свойство статических характеристик, заключающееся в преобразовании физических величин параметров с помощью коэффициента передачи.

Например, статическая характеристика регулирующего органа преобразует угол поворота вала исполнительного механизма в расход топлива, при этом коэффициент передачи

$$K = \frac{Q}{\varphi},$$

где Q — расход топлива, м^3/ч; φ — угол поворота, % хода.

Статическая характеристика рабочего пространства печи по температуре рабочего пространства преобразует расход топлива в температуру рабочего пространства:

$$K = \frac{t_F}{Q},$$

где t_F — температура рабочего пространства печи, °С; Q — расход топлива, м^3/ч.

Статические характеристики реальных промышленных объектов управления или отдельных элементов контура управления обычно

получают путем проведения эксперимента на действующем объекте в реальных производственных условиях. Для математического описания экспериментальных характеристик используются различные методы анализа. Рассмотрим наиболее часто применяемый метод наименьших квадратов.

Применение метода наименьших квадратов для описания статических характеристик объектов управления. При математическом описании статических свойств объектов управления используются полученные экспериментально или расчетным путем исходные данные.

В производственных условиях статическая характеристика ОУ представляет собой экспериментальную статистическую зависимость между двумя параметрами — x и y. Для математического описания статических характеристик используются выражения, определяющие функциональную связь в виде

$$y = f(x),$$

где x — входной параметр элемента САР (обычно управляющее воздействие); y — значение выходного параметра объекта (обычно регулируемый параметр).

Функциональную зависимость $y = f(x)$, определяющую статистическую связь между x и y, называют ***теоретической линией регрессии***. Процедуру определения вида и параметров линии регрессии называют ***регрессионным анализом***.

Запас функций, которыми можно математически выразить линию регрессии, разнообразен, но обычно предпочтение отдается многочленам целых положительных степеней вида

$$\bar{y}(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots + a_k x^k,$$

где $\bar{y}(x)$ — координата теоретической линии регрессии; k — степень полинома.

Степень полинома выбирается из предположительного вида статической характеристики.

Так, многочлен первой степени (прямая линия) отображает равномерный рост или падение функции; многочлен второй степени — равноускоренное или равнозамедленное изменение $y(x)$ и указывает одну точку экстремума (поворота) функции — max или min; многочлен третьей степени — две точки экстремума, а многочлен k-й степени — $(k - 1)$ точек экстремума линии регрессии или несимметричную относительно x экстремальную характеристику $y = f(x)$.

При использовании статистических зависимостей необходимо помнить следующее: *как бы точно тот или иной многочлен не воспроизводил искомую зависимость в заданном интервале изменения аргумента, это не дает основания полагать, что вне этого интервала данный многочлен будет соответствовать действительному ходу изменения функции.*

Линия регрессии решает вопрос интерполяции, т. е. нахождения значений функции внутри некоторого интервала значений аргумента и плохо оценивает течение процесса вне рассматриваемого интервала (экстраполяция).

Для выбора и обоснования типа линии нет универсального метода и в каждом конкретном случае необходимо избирать свой способ решения задачи, определяемый конкретными условиями, но в любом случае при определении уравнения теоретической линии регрессии желательно, чтобы искомая линия подходила к экспериментальным точкам как можно ближе.

Близость каждой экспериментальной точки к линии регрессии $y(x)$ измеряется отрезком ординаты (остатком)

$$\Delta y_i = y_i - \bar{y}(x_i),$$

где y_i — экспериментальное значение при $x = x_i$; $\bar{y}(x_i)$ — ордината линии регрессии при $x = x_i$.

Обычно требуется, чтобы для всего интервала изменения аргумента выполнялось следующее условие приближения к каждой экспериментальной точке:

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - \bar{y}(x_i) \right]^2 \to \min, \tag{2.2}$$

где $n \in \mathbb{N}$ — количество экспериментальных пар.

Способ расчета коэффициентов линии регрессии, основанный на соблюдении требования (2.2), называют *методом наименьших квадратов* (МНК) (см. также гл. 7).

Этот метод расчета уравнения теоретической линии регрессии не единственный, но наиболее универсальный, поэтому нередко применяется при обработке экспериментальных данных в инженерной практике.

Передаточные функции систем автоматического регулирования. Процессы в линейных системах автоматического регулирования и их элементах обычно описываются линейными дифференциальными уравнениями, в частности, уравнениями с постоянными коэффициентами.

При записи линейного дифференциального управления придерживаются правила, согласно которому все члены уравнения, содержащие выходную величину y и ее производные, записываются в левой части уравнения, а входное воздействие x и его производные — в правой:

$$a_0 \frac{d^n y}{d\tau^n} + \ldots + a_{n-1} \frac{dy}{d\tau} + a_n y = b_0 \frac{d^m x}{d\tau^m} + \ldots + b_m x, \qquad (2.3)$$

где a_0, ..., a_n и b_0, ..., b_m — коэффициенты (параметры) уравнения.

В большинстве случаев параметры уравнения (2.3) можно принять постоянными. В случае изменения параметров во времени систему называют системой с переменными параметрами.

Уравнение (2.3) системы регулирования удобно представлять в символической (операторной) форме, заменив символ дифференцирования оператором p:

$$\frac{d}{d\tau} = p.$$

Такая операция замены носит название алгебраизации дифференциального уравнения (2.3). В линейных системах с постоянными параметрами она формально соответствует преобразованию Лапласа, в котором функции $y(\tau)$, заданной во времени и называемой оригиналом, ставится в соответствие функция $Y(p)$ комплексной переменной p, называемой изображением функции $y(\tau)$ по Лапласу.

Данное обстоятельство дает возможность применять для решения дифференциальных уравнений, описывающих процессы в системах регулирования, методы операционного исчисления.

После операции алгебраизации получим следующую операторную запись дифференциального уравнения (2.3):

$$\left(a_0 p^n + \ldots + a_{n-1} p + a_n\right) Y = \left(b_0 p^m + \ldots + b_m\right) X. \qquad (2.4)$$

Разделив все члены полученного уравнения на коэффициент a_n при выходной переменной Y, получим *стандартную форму* записи дифференциального уравнения элемента САР в операторной форме:

$$\left(T_n p^n + \ldots + T_{n-1} p + 1\right) Y = k\left(T_m p^m + \ldots + 1\right) X, \qquad (2.5)$$

где $T_n = \frac{a_0}{a_n}$; $T_{n-1} = \frac{a_{n-1}}{a_n}$; $k = \frac{b_m}{a_n}$; $T_m = \frac{b_0}{a_n}$.

Многочлен, стоящий в скобках при выходной переменной Y, принято называть характеристическим (собственным) оператором,

а при входной величине X — выходным оператором, или оператором воздействия. Коэффициенты T_i, имеющие размерность времени, называют постоянными времени.

Важной особенностью стандартной формы дифференциального уравнения является то, что размерности при слагаемых, входящих в характеристический оператор, не зависят от физической природы изучаемого объекта: коэффициент при выходной переменной y безразмерен и равен единице, а при остальных слагаемых (производных y) коэффициенты имеют размерность только времени. Это

Таблица 2.1. Таблица преобразования Лапласа

Оригинал	Изображение	Оригинал	Изображение
1	$\frac{1}{p}$	$t\sin\omega t$	$\frac{2p\omega}{\left(p^2+\omega^2\right)^2}$
t	$\frac{1}{p^2}$	$t\cos\omega t$	$\frac{p^2-\omega^2}{\left(p^2+\omega^2\right)^2}$
t^2	$\frac{2}{p^3}$	$\mathrm{sh}\omega t$	$\frac{\omega}{p^2-\omega^2}$
$t^n,\ n\in\mathbb{N}$	$\frac{n!}{p^{n+1}}$	$\mathrm{ch}\omega t$	$\frac{p}{p^2-\omega^2}$
$t^\alpha\ (\alpha>-1)$	$\frac{\Gamma(\alpha+1)}{p^{\alpha+1}}$	$e^{\lambda t}\sin\omega t$	$\frac{\omega}{(p-\lambda)^2+\omega^2}$
$e^{\lambda t}$	$\frac{1}{p-\lambda}$	$e^{\lambda t}\cos\omega t$	$\frac{p-\lambda}{(p-\lambda)^2+\omega^2}$
$te^{\lambda t}$	$\frac{1}{(p-\lambda)^2}$	$\frac{\sin t}{t}$	$\mathrm{arcctg}p$
$t^ne^{\lambda t},\ n\in\mathbb{N}$	$\frac{n!}{(p-\lambda)^{n+1}}$	$\frac{1}{t}(1-e^{-t})$	$\ln\left(1+\frac{1}{p}\right)$
$t^\alpha e^{\lambda t},\ \alpha>-1$	$\frac{\Gamma(\alpha+1)}{(p-\lambda)^{\alpha+1}}$	$\delta(t)$	1
$\sin\omega t$	$\frac{\omega}{p^2+\omega^2}$	$\delta(t-\alpha),\ \alpha>0$	$e^{-\alpha p}$
$\cos\omega t$	$\frac{p}{p^2+\omega^2}$		

обстоятельство позволяет обнаружить совершенно одинаковые временны́е закономерности протекания процессов в различных по своей физической природе системах (электрических, механических, тепловых и др.).

Процедура решения дифференциального уравнения (2.3) заменяется решением алгебраического уравнения (2.4) или (2.5), после чего делается переход от изображения к оригиналу функции $y(\tau)$ с помощью таблиц преобразования Лапласа (табл. 2.1).

При использовании преобразования Лапласа для решения дифференциальных уравнений следует учитывать следующие свойства преобразования:

- линейность:

$$L\{\alpha f(\tau) + \beta g(\tau)\} = \alpha F(p) + \beta G(p),$$

где α, β — любые комплексные постоянные; L — операция преобразования Лапласа;

- подобие:

$$L\{f(\alpha\tau)\} = \frac{1}{\alpha} F\left(\frac{p}{\alpha}\right);$$

- дифференцирование оригинала:

$$L\{f'(\tau)\} = pF(p) - f(0),$$

или в общем случае

$$f^{(n)}(\tau) = p^n F(p) - p^{n-1} f(0) - p^{n-2} f'(0) - \ldots - f^{(n-1)}(0), \qquad (2.6)$$

где $f^{n-1}(0) \ldots f(0)$ — начальные условия для производных функции f.

Пример. Решить дифференциальное уравнение

$$y'' + 16y = 0 \qquad (2.7)$$

при начальных условиях $y'(0) = 4$; $y(0) = 0$ с использованием преобразования Лапласа.

Решение. Проведем преобразование исходного уравнения, используя свойство (2.6):

$$p^2 Y(p) - py(0) - y'(0) + 16Y(p) = 0.$$

Отсюда выразим изображение $Y(p)$ и, подставив начальные условия, получим

$$Y(p) = \frac{4}{p^2 + 16} = \frac{4}{p^2 + 4^2}.$$

В соответствии с табл. 2.1 найдем оригинал из полученного изображения функции:

$$y(\tau) = \sin(4\tau).$$

Полученная функция является решением заданного дифференциального уравнения (2.7).

Еще одной важной и удобной в практических приложениях характеристикой, описывающих динамические свойства элемента САР, является *передаточная функция*, определяемая как отношение изображений выходной переменной $Y(p)$ к входной $X(p)$, взятое при нулевых начальных условиях:

$$W(P) = \frac{Y(P)}{X(P)}.$$

Например, для дифференциального уравнения элемента САР (2.5) выражение для изображения выходной переменной $Y(p)$ запишется так:

$$Y(P) = W_1(P)X(P),$$

где $W_1(P) = \dfrac{k\left(T_m P^m + \ldots + 1\right)}{\left(T_n P^n + \ldots + T_{n-1}P + 1\right)}$ — передаточная функция по каналу «входной сигнал $X(p)$ — выходная величина $Y(p)$».

Пример. Записать дифференциальное уравнение и его решение для реального технологического (физического) процесса — нагрева теплотехнически тонкого тела в нагревательной печи камерного типа.

Решение. Общий вид нагревательной печи, для которой будет строиться математическая модель нагрева, показан на рис. 2.6, *а*. В качестве выходного параметра системы выступает температура нагреваемого тела t_M, в качестве входного параметра — температура рабочего пространства нагревательной печи t_F.

Тепловой поток на поверхность тела пропорционален разности температур рабочего пространства нагревательной печи t_F и нагреваемого тела t_M и рассчитывается по формуле:

$$q = \alpha\left(t_F - t_M\right),$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м$^2\cdot$ К).

За время $\Delta\tau$ нагреваемое тело аккумулирует тепло в количестве:

$$Q = \alpha F\left(t_F - t_M\right)\Delta\tau,$$

где F — площадь тепловоспринимающей поверхности нагреваемого тела, м^2.

Аккумулированное тепло затрачивается на повышение температуры тела на величину Δt_M. Составим уравнение теплового баланса (учитывая, что в соответствии с законом сохранения энергии тепло, переданное телу, затрачивается на увеличение его энтальпии):

$$\alpha F\left(t_F - t_M\right)\Delta\tau = cM\Delta t_M,$$

где c — удельная теплоемкость нагреваемого тела, Дж/(кг·К); M — масса нагреваемого тела, кг.

Отсюда получим:

$$\frac{\alpha F}{cM}\left(t_F - t_M\right) = \frac{\Delta t_M}{\Delta\tau}. \tag{2.8}$$

Введем обозначение:

$$\frac{\alpha F}{cM} = K.$$

Определим размерность полученного коэффициента:

$$\frac{\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}\cdot\text{м}^2}{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}\cdot\text{кг}} = \frac{\text{Вт}}{\text{Дж}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Дж}\cdot\text{с}} = \frac{1}{\text{с}}.$$

Выразим из (2.8) температуру рабочего пространства нагревательной печи:

$$t_F = \frac{1}{K}\frac{\Delta t_M}{\Delta\tau} + t_M.$$

Введем обозначение $\frac{1}{K} = T_0$, где T_0 — постоянная времени, с:

$$t_F = T_0\frac{\Delta t_M}{\Delta\tau} + t_M.$$

Введем обозначения $x = t_F$, $y = t_M$ и приняв $\Delta\tau \to 0$, получим линейное дифференциальное уравнение первого порядка, описывающее теплообмен между рабочим пространством нагревательной печи и нагреваемым телом:

$$x = T_0\frac{dy}{d\tau} + y. \tag{2.9}$$

Для полученного дифференциального уравнения запишем передаточную функцию. После замены переменной $\frac{d}{d\tau} = p$ дифференциальное уравнение (2.9) в операторной форме примет вид:

$$X(p) = T_0 pY(p) + Y(p).$$

Приведем подобные, получим:

$$X(p) = Y(p)(T_0 p + 1). \tag{2.10}$$

Отсюда передаточная функция системы запишется в виде:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{T_0 p + 1}.$$

Найдем аналитическое решение дифференциального уравнения (2.9) с использованием таблиц преобразования Лапласа (см. табл. 2.1) при подаче на вход системы единичного ступенчатого воздействия, т. е. при $x(\tau) = 1$:

$$X(p) = \frac{1}{p}.$$

Подставим полученное изображение функции в (2.10) и выразим $Y(p)$:

$$Y(p) = \frac{1}{p}\frac{1}{T_0 p + 1} = \frac{1}{p(T_0 p + 1)}.$$

В табл. 2.1 не содержится оригинал изображения полученной функции, поэтому представим изображение функции в виде суммы функций, изображения которых имеются в табл. 2.1.

В общем виде изображение суммы можно записать так:

$$Y(p) = \frac{A}{p} + \frac{B}{p + \lambda}, \tag{2.11}$$

где $\lambda = \frac{1}{T_0}$; A, B — значения числителя, которые находятся из решения системы уравнений, построенной исходя из следующих соображений:

$$\frac{A}{p} + \frac{B}{p + \lambda} = \frac{A(p + \lambda) + Bp}{p(p + \lambda)} = \frac{(A + B)p + A\lambda}{p(p + \lambda)} = \frac{\lambda}{p(p + \lambda)},$$

откуда система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} A + B = 0 \\ A = 1. \end{cases}$$

Отсюда $B = -1$. Получим изображение для функции (2.11):

$$Y(p) = \frac{1}{p} - \frac{1}{p + \lambda}. \tag{2.12}$$

Из табл. 2.1 запишем оригинал изображения (2.12) при нулевых начальных условиях:

$$y(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\frac{t}{T_0}}. \tag{2.13}$$

График решения дифференциального уравнения (2.9) при $T_0 = 25$ с показан на рис. 2.9.

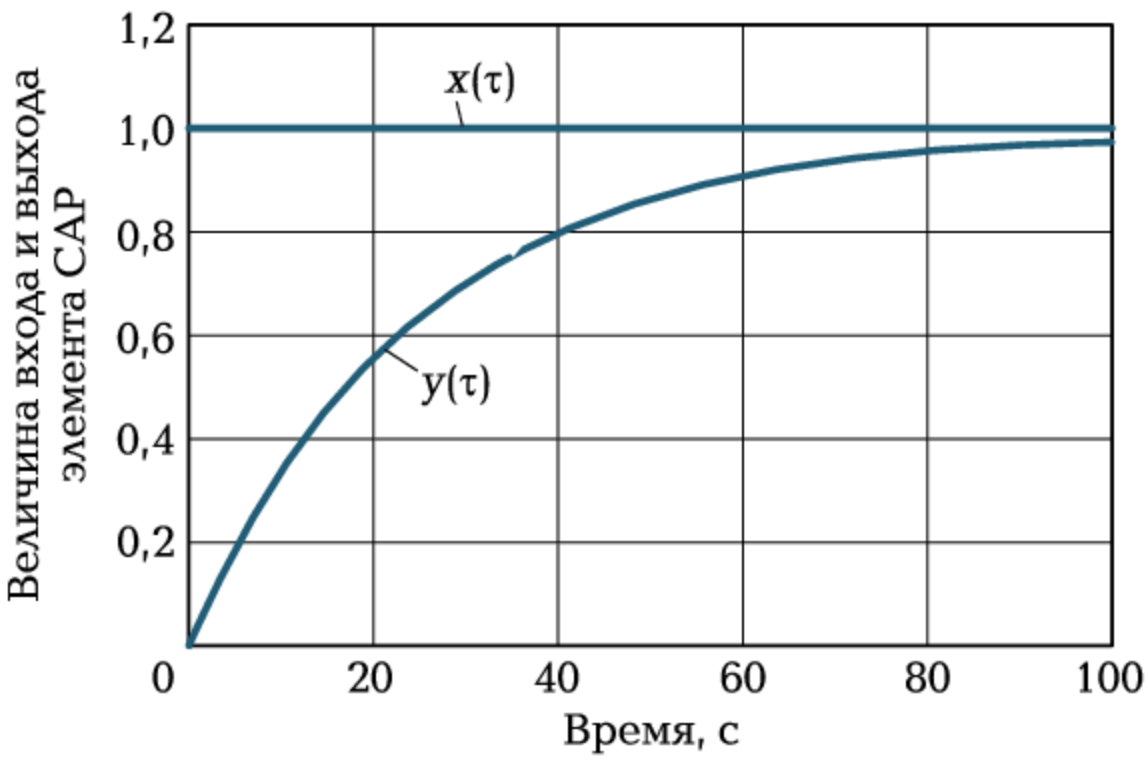


Рис. 2.9. График решения дифференциального уравнения (2.9) при $T_0 = 25$ с

Использование передаточных функций позволяет производить анализ САР любой сложности. Отдельные элементы САР могут соединяться в самых разных сочетаниях, однако любую сложную систему можно всегда рассматривать как совокупность трех видов соединений звеньев: последовательного, параллельного и встречно-параллельного. Рассмотрим, каким образом можно найти передаточную функцию этих соединений по известным передаточным функциям входящих в них звеньев.

Передаточная функция системы последовательно соединенных звеньев, где выходная величина предыдущего звена является входной величиной последующего (рис. 2.10, *а*), равна произведению передаточных функций отдельных звеньев:

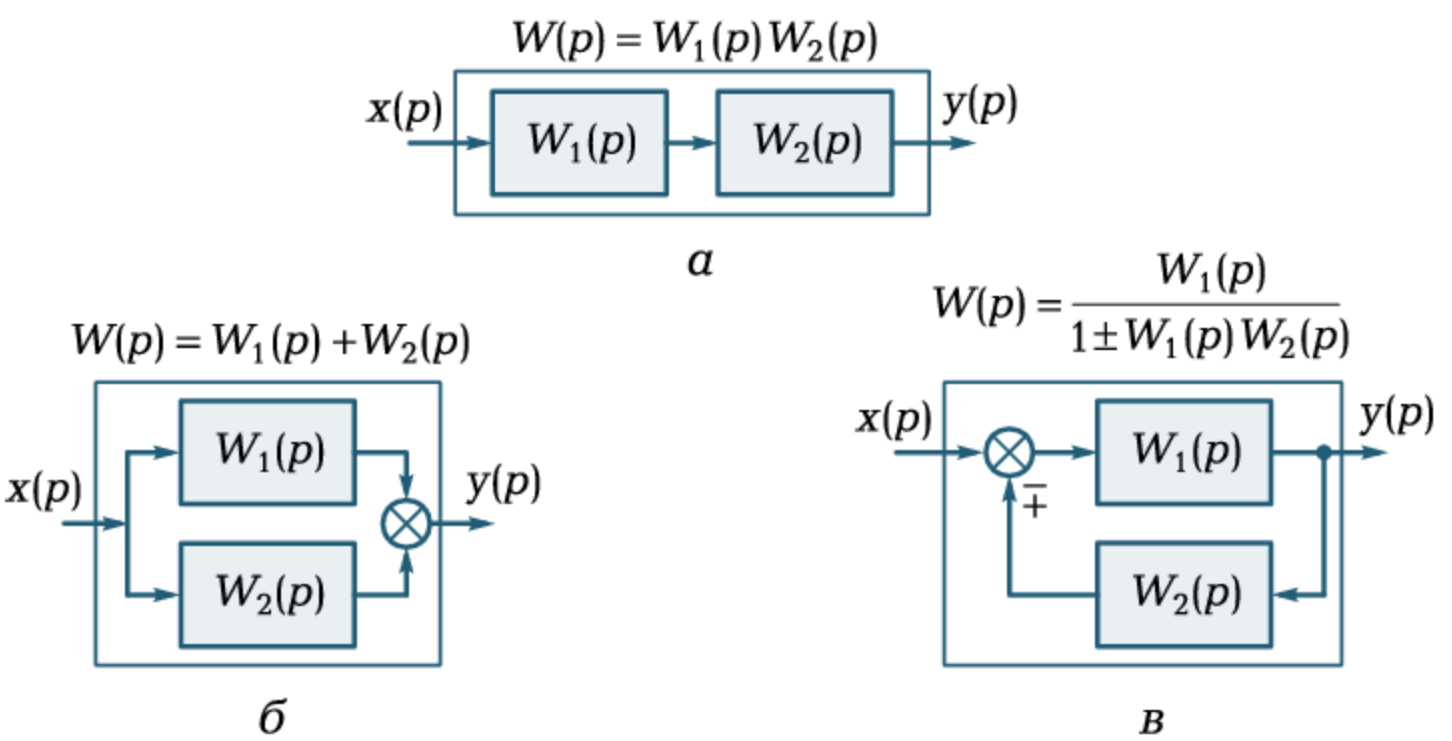


Рис. 2.10. Передаточная функция при последовательном (*а*), параллельном (*б*) и встречно-параллельном (*в*) соединении звеньев

$$W(p) = \prod_{i=1}^{n} W_i(p). \qquad (2.14)$$

Передаточная функция системы, состоящий из параллельно соединенных звеньев, где входная величина одновременно подается на входы всех звеньев, а выходная величина равна сумме выходных величин отдельных звеньев (рис. 2.10, *б*), равна сумме передаточных функций этих звеньев:

$$W(p) = \sum_{i=1}^{n} W_i(p). \qquad (2.15)$$

Передаточная функция системы звеньев со встречно-параллельным соединением (соединением с обратной связью) (рис. 2.10, *в*), где на вход одновременно с входной величиной подается выходная величина, прошедшая через звено с передаточной функцией $W_2(p)$, равна

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p)W_2(p)}. \qquad (2.16)$$

Знак «+» в знаменателе относится к ООС, т. е. когда $x_{вх1} = x_{вх} - x_{ОС}$; знак «–» — к ПОС ($x_{вх1} = x_{вх} + x_{ОС}$).

Типовые входные сигналы и выходные характеристики системы регулирования. Решение дифференциальных уравнений, описывающих поведение САР, — достаточно трудоемкий процесс. Анализ САР усложняется и разнообразием условий работы, конструкций объектов и систем управления. Поэтому для удобства сравнения динамических свойств различных вариантов систем и отдельных элементов принята совокупность типовых (стандартных) входных сигналов, которые подаются на вход элементов САР, и по анализу выходного сигнала производится сопоставление их параметров.

Типовое воздействие — это искусственное тестовое воздействие, реакция на которое достаточно полно характеризует динамические свойства реальной системы. Оно является наиболее часто встречающимся и наиболее неблагоприятным из всех возможных реальных воздействий.

В теории и практике САР применяют следующие типовые воздействия:

- единичная ступенчатая функция $1(\tau)$ (единичный скачок, функция Хевисайда);
- единичная импульсная функция $\delta(\tau)$ (дельта-функция);
- гармоническое воздействие.

На рис. 2.11 показаны типовые воздействия — $x(\tau)$ и возможные реакции элемента САР на эти воздействия — $y(\tau)$.

Ступенчатая функция в момент времени $\tau = 0$ скачком достигает значения, равного единице, и далее остается постоянной. Можно записать

$$1(\tau) = \begin{cases} 0, \tau < 0; \\ 1, \tau \geq 0. \end{cases}$$

Появление ступенчатого сигнала для систем промышленной автоматизации означает резкое изменение на входе системы автоматического регулирования величины задания, приложение нагрузки, подключение входа элемента системы и т. д. Ступенчатая функция является наиболее простым и наглядным случаем приложения входного сигнала (рис. 2.11, *а*).

Ступенчатая функция вызывает переходный процесс на выходе звена или системы, а кривую этого процесса называют *переходной характеристикой* (*функцией*) *з*вена или системы регулирования. Переходная функция $h(\tau)$ звена или системы — это реакция на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях. Она характеризует переход системы от одного установившегося режима к другому. Пример расчета переходной функции звена приведен на с. 41, а результат расчета и вид полученной переходной характеристики — на рис. 2.9.

Импульсная функция является результатом дифференцирования единичной ступенчатой функции, т. е.

$$\delta(\tau) = 1'(\tau),$$

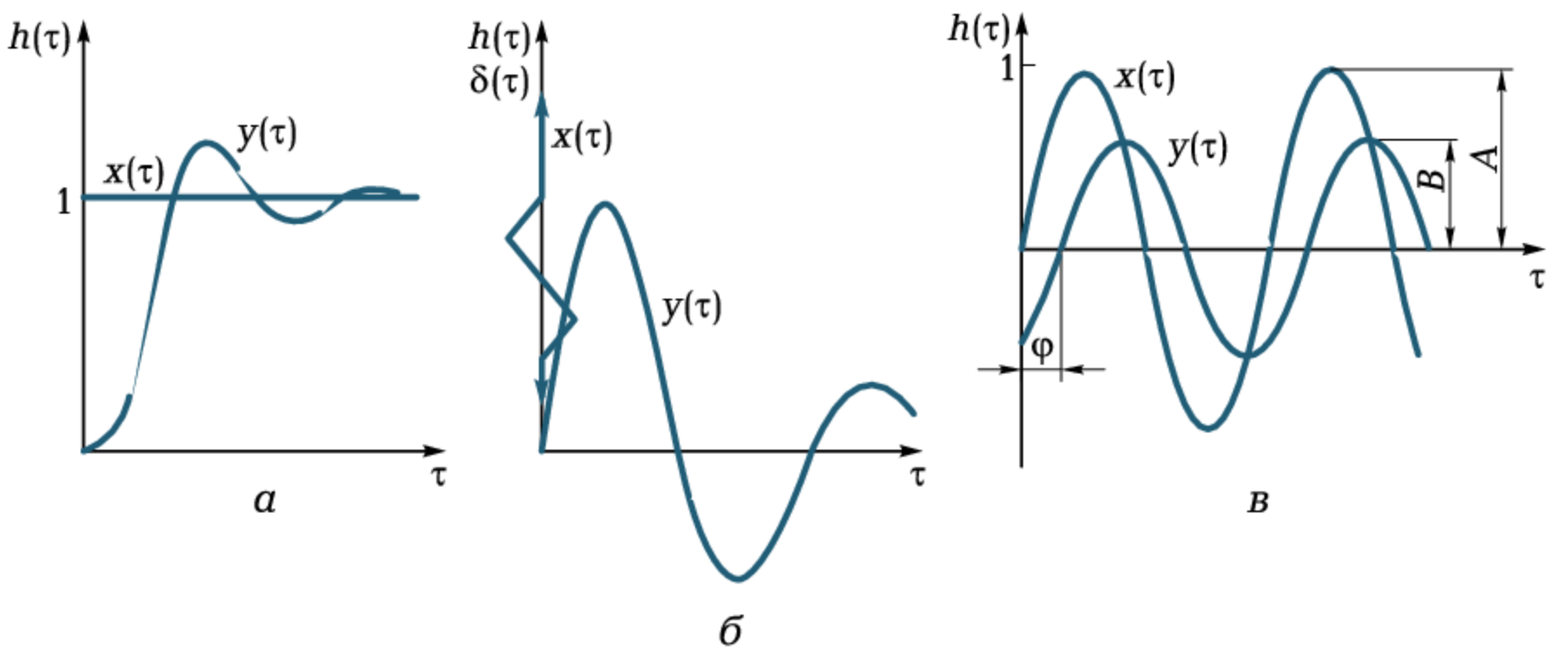


Рис. 2.11. Реакция системы на типовые входные воздействия:
а — единичное ступенчатое; *б* — импульсное; *в* — гармоническое

и представляет собой импульс бесконечно большой величины и бесконечно малой длительности. Площадь импульса равна единице, так как

$$\int_0^{\tau} 1'(\tau)d\tau = 1.$$

Практически импульсную функцию можно рассматривать как предел прямоугольного импульса высотой h и длительностью $\Delta\tau$, когда $h \to \infty$, $\Delta\tau \to 0$, но при этом соблюдается условие:

$$h\Delta\tau = 1.$$

Примерами кратковременных импульсных воздействий могут служить удары в механических системах, сила отдачи при выстреле и т. д.

Реакция системы на импульсную функцию при нулевых начальных условиях носит название импульсной переходной функции, импульсной характеристики или весовой функции системы. График импульсной переходной функции во времени называют *импульсной переходной характеристикой* (рис. 2.11, *б*).

Гармоническое (*синусоидальное*) *воздействие* задают в виде синусоидального сигнала с частотой $\omega = 0 \ldots \infty$ и единичной амплитудой A. Выходная величина элемента САР также изменяется по синусоидальному закону с частотой ω, но с другой амплитудой B и сдвинута по фазе относительно входного сигнала на угол φ (рис. 2.11, *в*). Характеристика зависимости отношения амплитуд выходного сигнала к входному (т. е. B/A) от частоты входного сигнала называется *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ); характеристика отношения сдвига фазы выходного сигнала относительно входного — *фазо-частотной характеристикой* (ФЧХ).

2.5. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА ПО КРИВОЙ РАЗГОНА

В производственных условиях наиболее просто динамические параметры объекта определяются по кривым разгона.

Кривая разгона — это траектория изменения во времени выходного параметра объекта при однократном скачкообразном возмущении входным воздействием.

В теории управления вместо кривой разгона используется переходная функция (или временна́я характеристика), представляющая

собой траекторию изменения выходного параметра при единичном скачкообразном входном возмущающем воздействии.

Замена переходной функции кривой разгона объясняется трудностью практической реализации единичного возмущающего воздействия (1 % хода исполнительного механизма) и невозможностью в условиях действия случайных технологических помех выделить реакцию объекта на единичное возмущение. Поэтому при снятии кривой разгона возмущение принимают равным 10...15 % от максимально возможного (100 %) входного воздействия.

В зависимости от траектории кривой разгона все реальные промышленные объекты управления можно разделить на три вида:

- объекты с самовыравниванием (статические);
- без самовыравнивания (астатические);
- с самовыравниванием и без самовыравнивания с запаздыванием.

Примеры объектов различного вида и соответствующие траектории кривых разгона представлены на рис. 2.12, *а*...*в*.

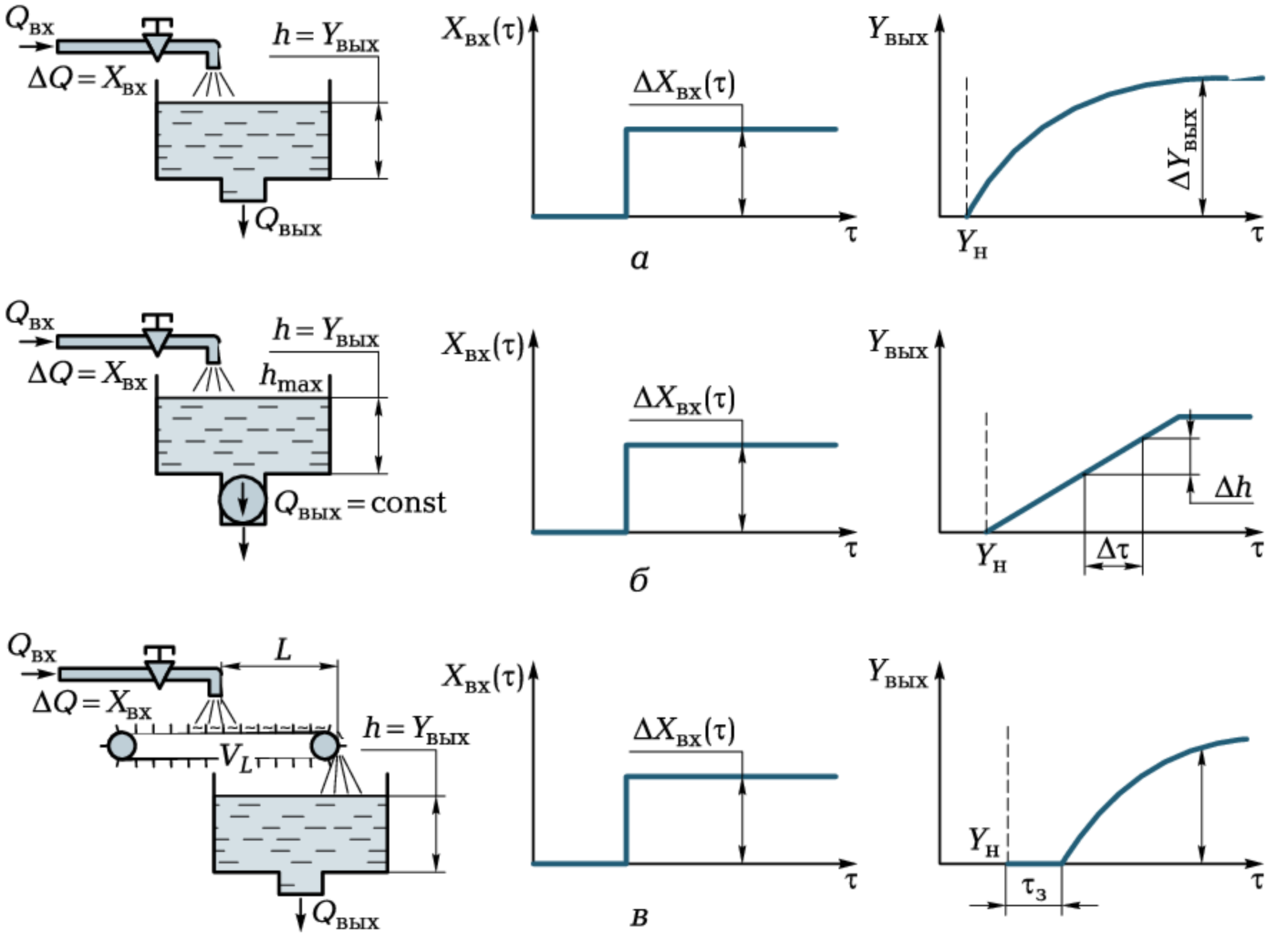


Рис. 2.12. Примеры объектов управления:

а — объект с самовыравниванием; *б* — объект без самовыравнивания; *в* — объект с запаздыванием и самовыравниванием

На рис. 2.12 представлен объект «бак с водой». Расход воды на наполнение бака составляет $Q_{вх}$ — это входная величина объекта; уровень воды в баке h — выходная величина объекта; расход воды на слив $Q_{вых.}$ Для формализации задачи обозначим входную величину через $X_{вх}$, выходную — через $Y_{вых}$. В некоторый момент времени расход воды на наполнение увеличился на величину $\Delta Q = \Delta X_{вх}$. Уровень воды в баке начал изменяться от начального уровня $Y_н$ в сторону увеличения. На рис. 2.12, *а* показан бак со свободным сливом, расход сливаемой воды зависит от уровня воды в баке. На рис. 2.12, *б* расход сливаемой воды определяется подачей насоса и остается постоянным независимо от уровня. На рис. 2.12, *в* вода для наполнения бака поступает в бак не напрямую, а через конвейер, длиной L, что приводит к запаздыванию поступления воды в бак.

Большинство объектов промышленного и металлургического производства — объекты с самовыравниванием. В таких объектах изменение выходной величины после скачкообразного возмущения для одноемкостных объектов происходит с постоянно уменьшающейся скоростью (по экспоненте) до момента достижения нового установившегося значения (см. рис. 2.12, *а*). Это свойство объекта восстанавливать нарушенное равновесие на новом уровне называют *самовыравниванием*.

Наличие свойства самовыравнивания объясняется действием физических факторов, компенсирующих влияние возмущающего воздействия. В примере, показанном на рис. 2.12, возрастание гидростатического давления при повышении уровня жидкости в сосуде приводит к увеличению расхода воды из сосуда, чем и компенсируется увеличение притока.

В объектах без самовыравнивания (см. рис. 2.12, *б*) изменение выходной величины происходит с постоянной скоростью и беспредельно (до возникновения аварийной ситуации). В таком объекте поддержание регулируемого параметра на заданном уровне возможно только при условии, когда $Q_{вх} = Q_{вых}$ (приток равен расходу). Например, приток стали в кристаллизатор МНЛЗ должен быть равен объему металла, вытягиваемого из кристаллизатора.

В объектах с запаздыванием (см. рис. 2.12, *в*) регулируемая величина начинает изменяться не одновременно с изменением входной, а через время $\tau_з$, называемое *временем запаздывания*:

$$\tau_з = L / V_L,$$

где L — длина транспортного участка; V_L — скорость движения транспортного устройства.

Необходимо отметить, что эффект запаздывания может возникать в многоемкостных объектах при последовательном соединении нескольких инерционных звеньев, каждое из которых не имеет запаздывания (см. инерционное звено второго порядка на с. 60)).

Реальные, полученные экспериментально кривые разгона отличаются от приведенных на рис. 2.12, *а* и *б* — они имеют S-образный вид (рис. 2.13).

Динамические параметры объекта количественно оцениваются следующими показателями:

- $\tau_з$ — время запаздывания — интервал времени от начала возмущения $\tau = 0$ до момента начала изменения выходной величины с постоянной максимальной скоростью $\left(\frac{dy}{d\tau}\right)_{max}$ или интервал времени от момента $\tau = 0$ до момента пересечения касательной к траектории $y(\tau)$ в точке максимальной скорости $M\left(\frac{dy}{d\tau}\right)_{max}$ с осью времени (см. рис. 2.13, *б*);
- T_0 — время разгона (постоянная времени) объекта, характеризует инерционные свойства объекта — время, в течение которого выходная величина $y(\tau)$ переходит из одного установившегося

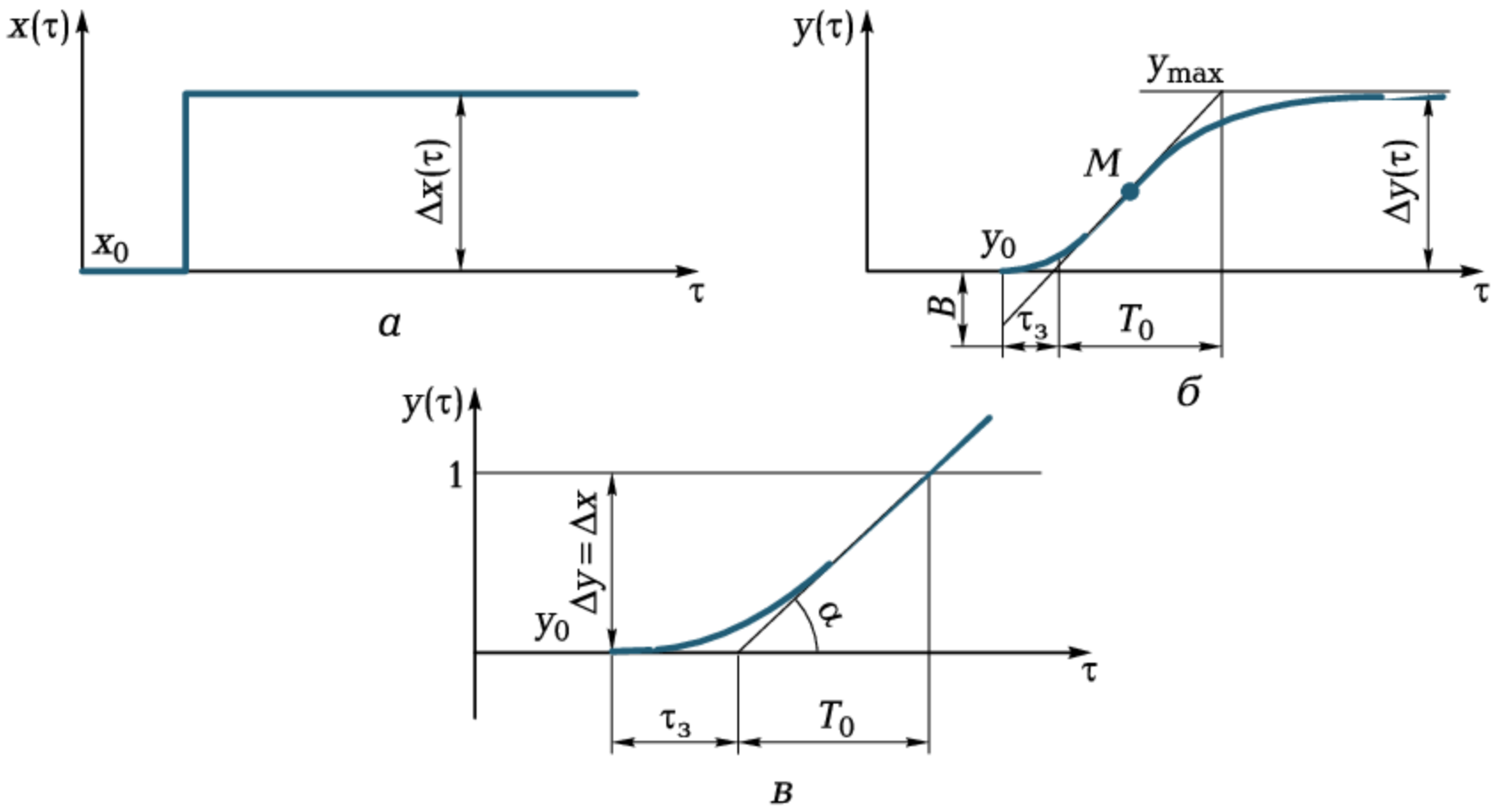


Рис. 2.13. Входное ступенчатое воздействие (*а*) на объект (в формализованной задаче соответствует изменению расхода воды в баке) и кривые разгона (реакция на ступенчатое входное воздействие реального объекта: *б* — с самовыравниванием; *в* — без самовыравнивания)

состояния $y_0(\tau)$ в другое $y_{max}(\tau)$, если изменение этой величины происходит с постоянной максимальной скоростью $\left(\frac{dy}{d\tau}\right)_{max}$;

- $K_{об}$ — *коэффициент передачи объекта* — число единиц измерения выходной величины, приходящееся на единицу измерения входного параметра:

$$K_{об} = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \tag{2.17}$$

Это характеристика аналогична коэффициенту передачи, определяемому по статической характеристике линейного элемента САР.

Необходимо помнить, что кривая разгона содержит две точки — $y_0(\tau)$ и $y_{max}(\tau)$ статической характеристики объекта; определение статической характеристики объекта осуществляется последовательным снятием кривых разгона; установившимся состоянием объекта следует считать интервал времени, равный $(3\ldots4)T_0$ от момента скачкообразного однократного изменения входного параметра.

В некоторых случаях при определении динамических характеристик теплоэнергетических объектов вместо постоянной времени объекта T_0 используют параметр ξ — *скорость разгона объекта*, которая определяется так:

$$\xi = \frac{B}{\tau_з \Delta x} = \frac{\mathrm{tg}\alpha}{\Delta x}. \tag{2.18}$$

Этот параметр характеризует максимальную скорость изменения $y(\tau)$, приходящуюся на единицу изменения входного параметра Δx.

Вместо коэффициента передачи объекта $K_{об}$ также можно использовать *коэффициент самовыравнивания*:

$$\rho = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{1}{K_{об}}. \tag{2.19}$$

Необходимо помнить, что общее запаздывание $\tau_з$ (см. рис. 2.13, *б*) складывается из чистого транспортного запаздывания (см. рис. 2.12, *в*) и емкостного (переходного) запаздывания.

Для астатического объекта кривая разгона приведена на рис. 2.13, *в*.

Астатические объекты характеризуются следующими динамическими параметрами: $\tau_з$ — время запаздывания; $K'_{об}$ — *условный коэффициент передачи*, который определяют как установившееся

значение скорости изменения выходной величины при величине возмущения $\Delta x = 1$ (по сути это величина ξ — скорость разгона объекта (2.18)):

$$K'_{об} = \frac{\Delta y(\tau)_{max}}{\Delta x}\left[\frac{\text{Ед. изм. регулируемой величины}}{\text{с} \cdot \% \text{ хода исполнительного механизма}}\right].$$

Для характеристики динамических свойств астатического объекта можно использовать условную постоянную времени T', равную времени изменения выходной величины на единицу ее измерения при единичном возмущении $\Delta x = 1$. Очевидно, что

$$K'_{об} = \frac{1}{T'}.$$

Характерным показателем динамических свойств объекта является отношение $\frac{\tau}{T_0}$. Чем меньше это отношение, тем благоприятнее условия для автоматического управления таким объектом.

Поскольку различные виды динамических характеристик определяют одинаковые динамические параметры ОУ, существуют методы взаимного преобразования динамических характеристик.

2.6. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ, СОСТАВЛЯЮЩИХ КОНТУР РЕГУЛИРОВАНИЯ

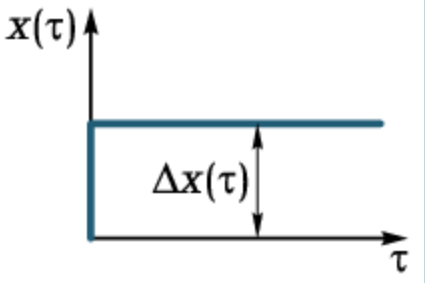
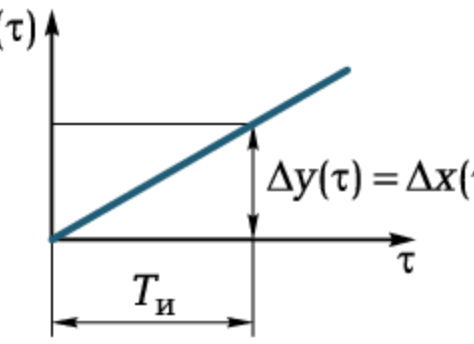
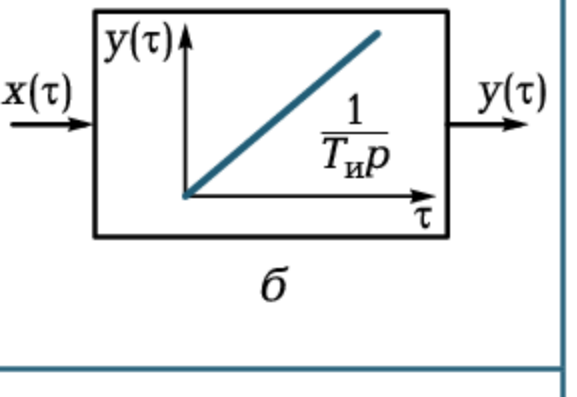
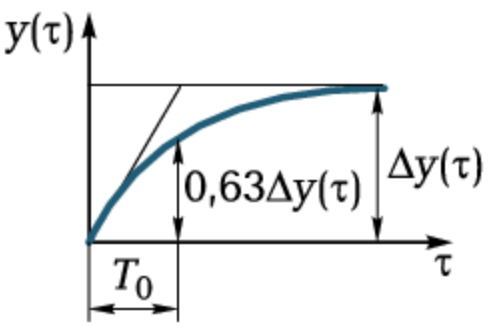
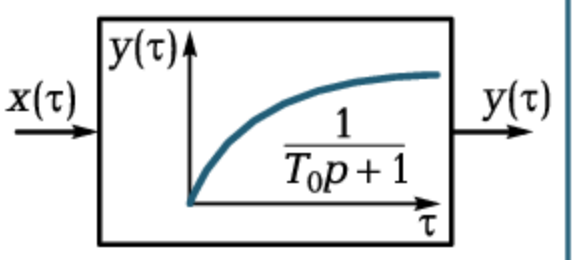
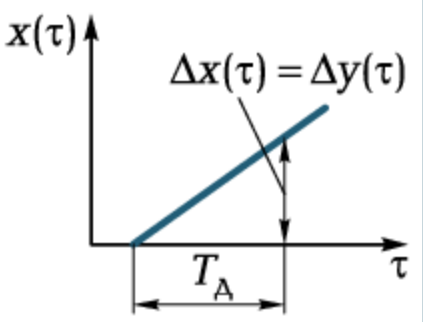
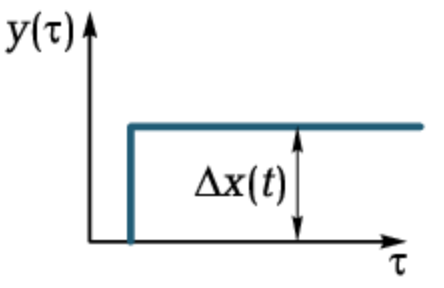
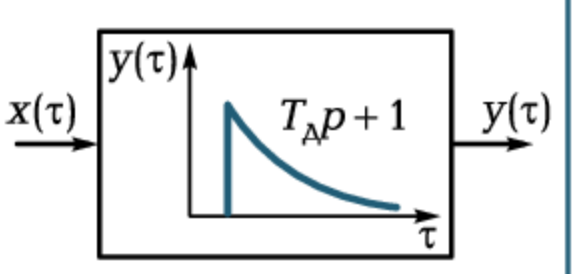
Контур системы автоматического регулирования можно представить в виде комбинации соединения звеньев различного типа. При этом всегда можно выделить звенья, которые описываются простейшими алгебраическими и дифференциальными уравнениями. Такие звенья называют элементарными звеньями САР. Рассмотрим уравнения и характеристики этих звеньев (табл. 2.2).

Пропорциональное (безынерционное) звено. Между входной и выходной величинами пропорционального звена отсутствует сдвиг во времени. Выходная величина изменяется пропорционально входной мгновенно.

Для такого звена справедливо соотношение:

$$\frac{y(\tau)}{x(\tau)} = K,$$

Таблица 2.2. Обозначение и переходные характеристики типовых звеньев САР

Тип звена	Входное воздействие	Выходное воздействие	Обозначение звена
Пропорциональное			 а
Интегрирующее			б
Инерционное			 в
Дифференцирующее			 г

где $y(\tau)$ — изменение выходного параметра во времени; $x(\tau)$ — изменение входного параметра во времени; K — коэффициент передачи (усиления) звена.

Коэффициент K показывает, на сколько изменится выходная величина при изменении входной на единицу. Необходимо помнить, что размерности $y(\tau)$ и $x(\tau)$, как правило, не совпадают, тогда в отличие от коэффициента усиления величина K имеет размерность.

На эскизе *а* (см. табл. 2.2) показано условное обозначение пропорционального звена, передаточная функция и переходная характеристика (примером пропорционального звена может являться делитель напряжения, механический редуктор).

Интегрирующее звено. В интегрирующем звене скорость изменения выходной величины $dy/d\tau$ пропорциональна входной величине $x(\tau)$:

$$\frac{dy(\tau)}{d\tau} = \frac{x(\tau)}{T_{\text{и}}}$$

или

$$y(\tau) = \frac{1}{T_{\text{и}}}\int_0^{\tau} x(\tau)d\tau \text{ при } y(\tau) \in [0, y_{\max}].$$

При $x(\tau) = 0$ получим $y(\tau) = \text{const}$. В реальных звеньях изменение $y(\tau)$ может происходить только до некоторого предела (обычно заданного).

Постоянная величина $T_{\text{и}}$ называется *временем интегрирования*. Эта величина количественно характеризует скорость изменения выходного параметра, приходящуюся на единицу изменения входной величины $x(\tau)$. Чем больше $T_{\text{и}}$, тем меньше изменяется выходная величина в единицу времени.

Если входная и выходная величины однородны по своей физической природе, то численное значение $T_{\text{и}}$ определяется довольно просто в соответствии с эскизом *б* (см. табл. 2.2).

Если в момент времени $\tau = 0$ величина $x(\tau)$ скачком изменяется от нулевого до некоторого значения Δx, то выходная величина $y(\tau)$ возрастет линейно и за время $T_{\text{и}}$ прирост значения $y(\tau)$ станет равным величине Δx.

Переходная функция интегрирующего звена, определяющая траекторию изменения $y(\tau)$ при изменении $x(\tau)$ на единицу, определяется выражением:

$$h(\tau) = \frac{y(\tau)}{x(\tau)} = \frac{\tau}{T_{\text{и}}},$$

где $T_{\text{и}}$ характеризует запаздывающие свойства звена.

В качестве примера интегрирующего звена можно привести угол поворота вала исполнительного механизма (ИМ) постоянной скорости. Эти механизмы широко применяются в контурах управления технологическими параметрами.

При отсутствии управляющего напряжения вал двигателя неподвижен. При подаче управляющей команды (ступенчатое изменение входной величины $x(\tau)$) вал ИМ начинает вращаться с постоянной скоростью, которая определяется технической характеристикой ИМ.

Еще одним примером интегрирующего звена является наполнение бака водой. При открытии крана и постоянном расходе воды уровень воды в баке начинает изменяться линейно. При закрытии крана уровень не изменяется и остается постоянным.

Объекты, обладающие интегрирующими свойствами, очень сложны для управления и требуют более тщательного контроля эффективности работы управляющего контура.

Дифференцирующее звено. Если выходная величина звена пропорциональна скорости изменения входной величины, то такое звено называют дифференцирующим.

Это свойство звена характеризуется уравнением вида

$$y(\tau) = T_{\text{Д}} \frac{dx(\tau)}{d\tau},$$

где $T_{\text{Д}}$ — коэффициент пропорциональности, называемый временем дифференцирования.

Величина $T_{\text{Д}}$ определяет степень чувствительности выходной величины к изменению входной. Физический смысл количественной оценки значения $T_{\text{Д}}$ приведен на эскизе *г* (см. табл. 2.2).

Если параметры $x(\tau)$ и $y(\tau)$ имеют одинаковую физическую природу (например, напряжение), то величину $T_{\text{Д}}$ можно определить при условии, что $x(\tau)$ будет изменяться с постоянной скоростью

$$\frac{dx(\tau)}{d\tau} = \text{const}.$$

Время дифференцирования $T_{\text{Д}}$ дифференцирующего элемента есть время, за которое входная величина, изменяясь с постоянной скоростью, достигает значения выходной величины.

Если на входе идеального дифференцирующего звена сигнал $x(\tau)$ изменить скачком, то функция $y(\tau)$ за время $\Delta\tau \to 0$ сначала будет увеличиваться, а затем уменьшаться до нуля и при $y(\tau) = 0$ имеем:

$$\frac{dx(\tau)}{d\tau} = 0.$$

Для реальных систем, как правило, используется реальное дифференцирующее звено, которое имеет передаточную функцию:

$$W(p) = T_{\text{Д}} p + 1.$$

Инерционное звено. ***Инерционное звено первого порядка*** обычно называют инерционностью. Свойство инерционности в той или иной мере присуще всем реальным объектам регулирования. Это

одно из основных негативных явлений, с которыми необходимо бороться при управлении производственными объектами.

Иногда при наличии высокочастотных помех входного информационного сигнала (например, при использовании оптических датчиков для измерения и регулирования температуры поверхности нагреваемых в печи заготовок) инерционность на входе регулятора создается искусственно. Такой прием называют *сглаживанием* (демпфированием).

У инерционного звена первого порядка выходная величина $y(\tau)$ не следует непосредственно за изменением входной $x(\tau)$.

В установившемся состоянии при $\tau \to \infty$ соотношение $y(\tau)/x(\tau)$ принимают равным единице.

Графическое изменение входной $x(\tau)$ и выходной $y(\tau)$ величин и условное обозначение инерционного звена первого порядка представлены на эскизе *в* (см. табл. 2.2).

Инерционность звена (объекта) количественно оценивается постоянной времени T_0 — временем, за которое выходная величина $y(\tau)$ переходит из одного установившегося режима в другое (при скачкообразном изменении $x(\tau)$, если изменение будет происходить с постоянной максимальной скоростью).

У линейных звеньев значение T_0 постоянно, поэтому оно называется постоянной времени и объективно количественно характеризует инерционные свойства объекта.

Величина T_0 не зависит от величин входного воздействия. Дифференциальное уравнение инерционного звена первого порядка имеет вид:

$$T_0 \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = x(\tau). \qquad (2.20)$$

Если величина $x(\tau)$ изменяется скачкообразно, то, как было показано при решении дифференциального уравнения нагрева тела, $y(\tau)$ определяется выражением:

$$y(\tau) = 1 - e^{-c}, \;\; c = \frac{\tau}{T_0},$$

где τ — текущее время.

Преобразуем уравнение (2.20) следующим образом:

$$\frac{dy(\tau)}{d\tau} = \frac{x(\tau) - y(\tau)}{T_0}.$$

Заменим бесконечно малые приращения на конечные приращения:

$$\frac{\Delta y(\tau)}{\Delta \tau} = \frac{x(\tau) - y(\tau)}{T_0}.$$

Приращение $\Delta y(\tau)$ представляет собой разность значений выходной величины в начале и конце интервала времени $\Delta\tau$. Заменим $\Delta y(\tau) = y^k - y^{k-1}$, где k — номер интервала времени $\Delta\tau$, получим разностную формулу для расчета каждого последующего значения y^k:

$$y^k = \frac{\Delta \tau}{T_0}\left(x^{k-1} - y^{k-1}\right) + y^{k-1}. \qquad (2.21)$$

Это выражение позволяет численно (приближенно) рассчитать траекторию изменения $y(\tau)$ при любой траектории $x(\tau)$, т. е. рассчитать реакцию инерционного объекта на входное воздействие во времени, используя метод Эйлера.

Пример. Рассчитать изменение температуры рабочего пространства печи t_F, измеряемой термопарой с постоянной времени $T = 5$ с при заданной траектории изменения температуры факела (греющей среды $t_{г.с}$) во времени. Температура греющей среды зависит от расхода топлива. На рис. 2.14 сплошной линией показана траектория изменения температуры греющей среды.

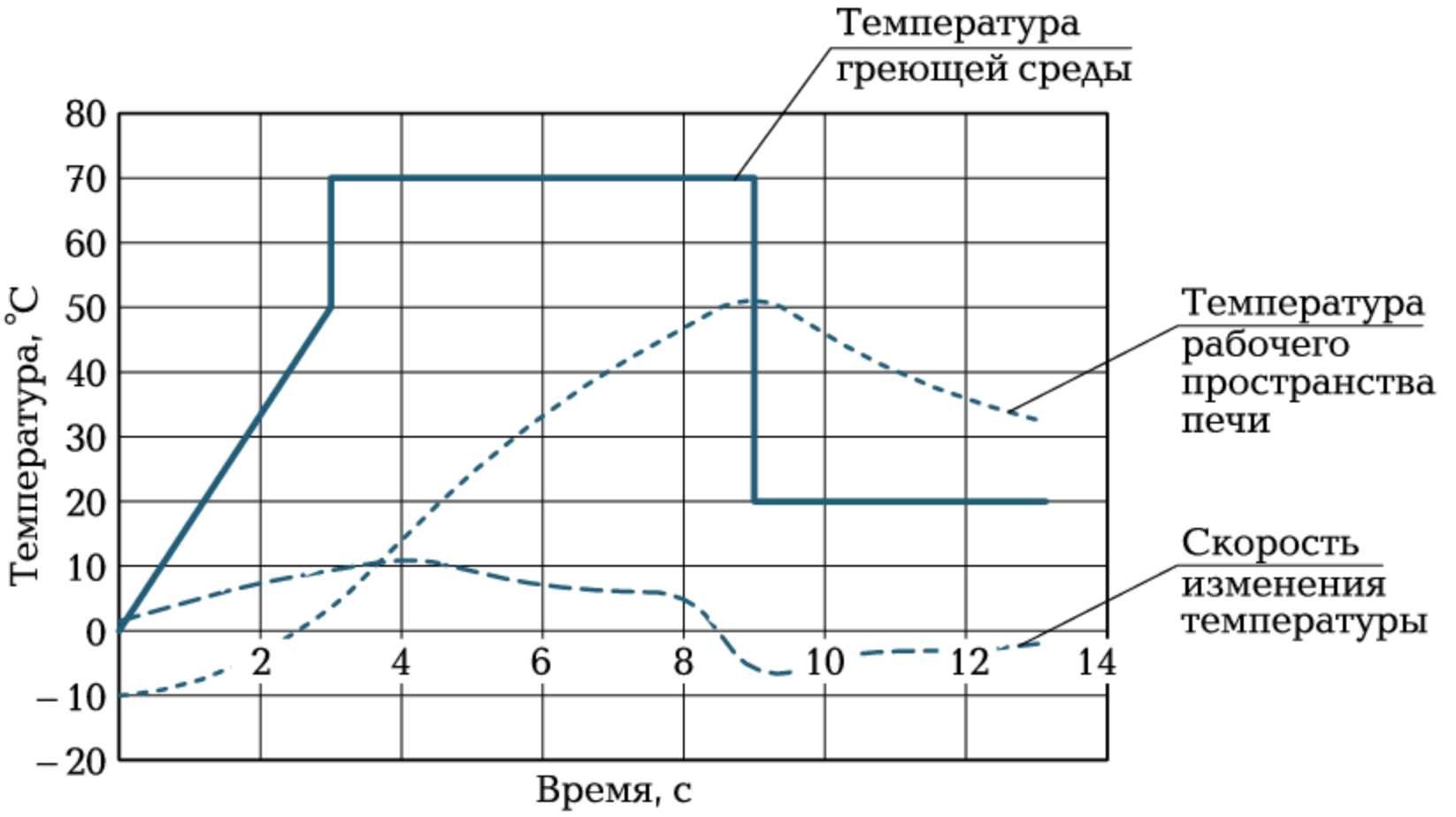


Рис. 2.14. Траектории изменения температуры греющей среды и температуры рабочего пространства печи и греющей среды

Решение. Уравнение (2.21) в соответствии с условием задачи будет иметь вид:

$$t_F^k = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{г.с}}^{k-1} - t_F^{k-1}\right) + t_F^{k-1}.$$

Предположим, что в момент времени $\tau = 0$ температура рабочего пространства печи была на 10 °С меньше температуры греющей среды. Учитывая значения, приведенные на рис. 2.14, получим $t_{\text{г.с}} = 0$ °С, $t_F = -10$ °С (отн. ед.) Температура рабочего пространства печи при $\tau = 1$ составит:

$$t_F^1 = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{г.с}}^0 - t_F^0\right) + t_F^0 = \frac{1}{5}(0 - (-10)) + (-10) = -8\ °\text{С}.$$

Зная температуру рабочего пространства печи в момент времени $\tau = 1$, можно рассчитать температуру в печи при $\tau = 2$:

$$t_F^2 = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{г.с}}^1 - t_F^1\right) + t_F^1 = \frac{1}{5}(15 - (-8)) + (-8) = -3{,}4\ °\text{С}.$$

Таблица 2.3. Зависимость изменения температуры металла и температуры печи от времени

Время, с	Температура, °С	
	греющей среды $t_{\text{г.с}}$	рабочего пространства печи t_F
0	0	–10,0
1	15	–8,0
2	35	–3,4
3	50	4,3
4	70	13,4
5	70	24,7
6	70	33,8
7	70	41,0
8	70	46,8
9	20	51,5
10	20	45,2
11	20	40,1
12	20	36,1
13	20	32,9

Проводя аналогичные расчеты во всех точках, получим значения скорости изменения температуры греющей среды и температуры рабочего пространства печи, приведенные в табл. 2.3 и на рис. 2.14.

Наличие инерционности существенно изменяет траекторию контролируемого (управляемого) параметра, и это обстоятельство необходимо учитывать при настройке контуров управления в производственных условиях.

Если величины $y(\tau)$ и $x(\tau)$ имеют разные размерности, то решение уравнения (2.20) в этом случае будет иметь вид

$$x(\tau) = 1 - e^{-c}K, \;\; c = \frac{\tau}{T},$$

где $K = \dfrac{\Delta y(\tau)}{\Delta x(\tau)}$ при скачкообразном изменении.

Инерционное звено второго порядка. Динамические свойства объекта для упрощения обычно аппроксимируют (представляют) как инерционное звено первого порядка. К сожалению, это не всегда возможно без ущерба для качества управления. Более точно представить динамические свойства объекта позволяет последовательное соединение нескольких (не менее двух) инерционностей первого порядка или инерционным звеном второго порядка, когда свойства звена определяются дифференциальным уравнением вида

$$T^2 \frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + 2T\xi \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = x(\tau),$$

где T — собственная постоянная времени звена; ξ — относительный коэффициент затухания, определяющий вид переходного процесса (при $\xi < 1$ — колебательный затухающий процесс; при $\xi \geq 1$ — апериодический переходный процесс).

Если используется последовательное соединение двух инерционных звеньев первого порядка, то справедливы соотношения:

$$T^2 = T_1 T_2; \;\; 2T\xi = T_1 + T_2; \;\; \xi = \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{T_1}{T_2} + \frac{T_2}{T_1} \geq 1;$$

$$T_1 = \frac{T}{\xi} - \sqrt{\xi^2 - 1}; \;\; T_2 = \frac{T}{\xi} + \sqrt{\xi^2 - 1},$$

где T_1, T_2 — постоянные времени двух инерционных звеньев первого порядка.

Справедливо положение: *последовательное соединение двух (или более) инерционных звеньев первого порядка может вести себя как апериодическое звено, т. е. обладать свойством самовыравнивания.*

В качестве примера инерционного звена второго порядка можно привести измерение температуры рабочего пространства теплотехнического агрегата с помощью термопары (ТП), установленной в защитном стакане.

В этом случае T_1 характеризует инерционность самой термопары, T_2 — защитного стакана при передаче тепла от греющей среды к термопаре.

Наличие нескольких инерционных элементов в ОУ, включенных последовательно, приводит к возникновению в объекте емкостного, или переходного, запаздывания. В этом случае объект какое-то время совершенно не реагирует на управляющее воздействие. Это оказывает негативное влияние на качество и эффективность управления.

Пример. При измерении температуры рабочего пространства нагревательных печей используется оптический пирометр (обычно полного излучения), свизированный на дно алундового или карбофраксного стакана, установленного в рабочем пространстве печи. Необходимо рассчитать выходной сигнал датчика температуры на скачкообразное изменение температуры греющей среды (факела) при изменении расхода топлива; при постоянной времени пирометра $T_2 = 2$ с, постоянной времени алундового стакана $T_1 = 6$ с и изменении температуры греющей среды на 50 °С. До нанесения скачкообразного возмущения система находилась в установившемся состоянии, т. е. температура алундового стакана практически одинакова с температурой греющей среды и равна 1 300 °С.

Решение. Обозначим: $t_{г.с}(\tau)$ — температура греющей среды; $t_c(\tau)$ — температура внутренней поверхности дна алундового стакана; $t_F(\tau)$ — текущее значение температуры, измеряемое оптическим (самым быстродействующим) датчиком.

В момент времени $\tau = 0$ температуру греющей среды скачкообразно увеличили на 50 °С. Поскольку до возмущения система находилась в установившемся состоянии, то $t_F(0) = t_c(0) = t_{г.с}(0) = 1\,300$ °С. Расчет траектории $t_c(\tau)$ и $t_{г.с}(\tau)$ производим в относительных единицах, переместив начало координат в точку $t = 1\,300$ °С по шкале температур.

При $\tau = 0$ считаем известными значения $t_F(\tau) = 0$ °С; $t_c(\tau) = 0$; $t_F(\tau) = 50$ °С. Используя метод Эйлера, получим численное решение для последовательного соединения двух инерционных звеньев первого порядка. Расчет траектории изменения выхода первого инерционного звена $t_c(\tau)$ производится по следующим формулам:

- при $\tau = 1$:

$$t_{\text{с}}^{1} = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{г.с}}^{0} - t_{\text{с}}^{0}\right) + t_{\text{с}}^{0} = \frac{1}{6}(50 - 0) + 0 = 8{,}33\ ^{\circ}\text{C};$$

- при $\tau = 2$:

$$t_{\text{с}}^{2} = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{г.с}}^{1} - t_{\text{с}}^{1}\right) + t_{\text{с}}^{1} = \frac{1}{6}(50 - 8{,}33) + 8{,}33 = 15{,}27\ ^{\circ}\text{C};$$

- при $\tau = 3$:

$$t_{\text{с}}^{3} = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{г.с}}^{2} - t_{\text{с}}^{2}\right) + t_{\text{с}}^{2} = \frac{1}{6}(50 - 15{,}27) + 15{,}27 = 21{,}06\ ^{\circ}\text{C}.$$

По аналогии определяем траекторию изменения $t_{\text{с}}(\tau)$ и для других моментов времени. Расчетные значения приведены в табл. 2.4.

При расчете траектории $t_F(\tau)$ необходимо в качестве входных воздействий использовать рассчитанные на предыдущем шаге значения $t_{\text{с}}(\tau)$. Учитывая, что при $\tau = 0$: $t_F(0) = t_{\text{с}}(0) = t_{\text{г.с}}(0)$, то скорость изменения выходной температуры также будет равна нулю, т. е. на первом шаге при $\tau = 1$ получим текущее значение $t_F(\tau) = 0°\text{C}$:

$$t_F^{1} = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{с}}^{0} - t_F^{0}\right) + t_F^{0} = \frac{1}{2}(0 - 0) + 0 = 0.$$

Таблица 2.4. Расчетные значения температуры рабочего пространства печи

Время, с	Температура, °С		
	греющей среды $t_{\text{г.с}}(\tau)$	алундового стакана $t_{\text{с}}(\tau)$	текущее значение $t_F(\tau)$
0	50	0,00	0,00
0,5	50	4,17	0,00
1	50	8,33	1,04
2	50	15,28	4,69
3	50	21,06	9,98
4	50	25,89	15,52
5	50	29,91	20,71
6	50	33,26	25,31
7	50	36,05	29,28
8	50	38,37	32,66
9	50	40,31	35,52
10	50	41,92	37,91

В реальных промышленных системах имеется зона нечувствительности и начальное значение выходного параметра сохраняется на первом интервале дискретизации расчета.

Для уменьшения ошибки расчета следует уменьшить интервал дискретизации (хотя бы на первых шагах).

Приведем подробное описание нескольких шагов расчета при $\Delta\tau = 0{,}5$ с:

- при $\tau = 0{,}5$:

$$t_{\text{с}}^{(0,5)} = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{г.с}}^{0} - t_{\text{с}}^{0}\right) + t_{\text{с}}^{0} = \frac{0{,}5}{6}(50 - 0) + 0 = 4{,}17\ ^{\circ}\text{C};$$

$$t_{F}^{(0,5)} = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{с}}^{0} - t_{F}^{0}\right) + t_{F}^{0} = \frac{0{,}5}{2}(0 - 0) + 0 = 0\ ^{\circ}\text{C};$$

- при $\tau = 1$:

$$t_{F}^{1} = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{с}}^{(0,5)} - t_{F}^{(0,5)}\right) + t_{F}^{(0,5)} = \frac{0{,}5}{2}(4{,}17 - 0) + 0 = 1{,}04\ ^{\circ}\text{C};$$

- при $\tau = 2$:

$$t_{F}^{2} = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{с}}^{1} - t_{F}^{1}\right) + t_{F}^{1} = \frac{1}{2}(8{,}33 - 1{,}04) + 1{,}04 = 4{,}69\ ^{\circ}\text{C};$$

- при $\tau = 3$:

$$t_{F}^{3} = \frac{\Delta\tau}{T}\left(t_{\text{с}}^{2} - t_{F}^{2}\right) + t_{F}^{2} = \frac{1}{2}(15{,}27 - 4{,}69) + 4{,}69 = 9{,}98\ ^{\circ}\text{C}.$$

По аналогии определяем траекторию изменения $t_F(\tau)$ для других моментов времени. Расчетные значения приведены в табл. 2.4.

На рис. 2.15 показаны расчетные траектории $t_{\text{г.с}}$ $t_{\text{с}}(\tau)$ и $t_F(\tau)$. Траектория $t_F(\tau)$ содержит элементы запаздывания. При $\tau = 3$ траектория $t_F(\tau)$ имеет точку перегиба. В этой точке скорость изменения сигнала максимальна.

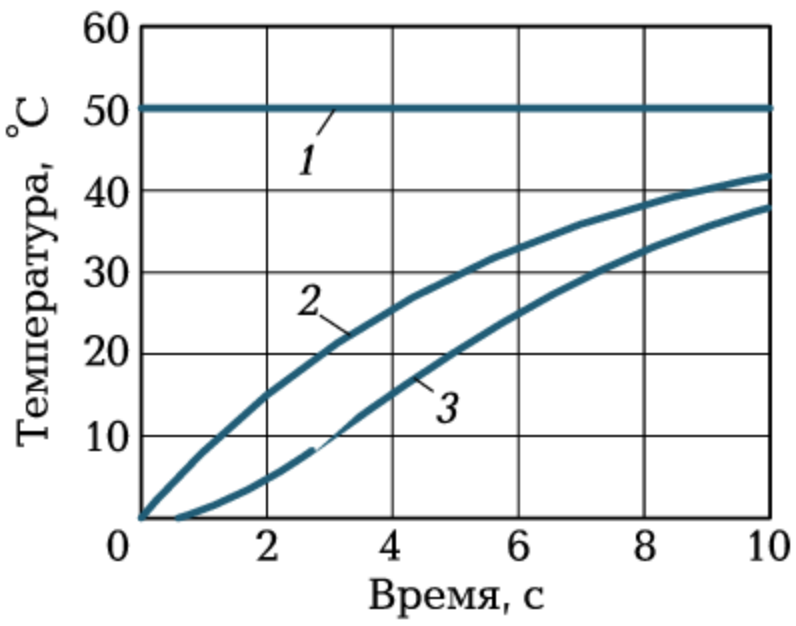


Рис. 2.15. Траектории изменения температур во времени:
1 — $t_{\text{г.с}}(\tau)$; *2* — $t_{\text{с}}(\tau)$; *3* — $t_F(\tau)$

В результате расчетов имеем результирующее звено с динамическими параметрами $\tau_з = 1{,}4$ с, $T = 8$ с, где $\tau_з$ — время запаздывания, т. е. время от момента изменения входного параметра до момента начала изменения выходного параметра с постоянной максимальной скоростью. Такое запаздывание называется емкостным, переходным, и определяется последовательным соединением нескольких инерционных звеньев. Это переходное (динамическое) запаздывание не следует путать с «чистым» (транспортным) запаздыванием.

Звено запаздывания. Если изменение выходной величины полностью повторяет изменение входной (например, количество материала на транспортерной ленте при изменении расхода материала дозатором), но между ними имеется сдвиг во времени, то в данном случае существует запаздывание выходной величины по отношению к входной и соблюдается условие:

$$y(\tau) = x(\tau - \tau'_з),$$

где $\tau'_з$ — время запаздывания «чистое», или транспортное.

Явление запаздывания можно представить как результат прохождения сигнала по бесконечному числу последовательно соединенных инерционных звеньев первого порядка, когда сумма постоянных времени отдельных звеньев без обратной связи равна $\tau^*_з$.

При расчетах звено с запаздыванием можно приближенно заменить инерционным звеном первого порядка, если $\tau^*_з$ достаточно мало. Это всегда можно сделать, если в один контур управления со звеном запаздывания включено инерционное звено первого порядка с намного большей постоянной времени или интегрирующее звено.

Структурные схемы реальных контуров управления содержат различные виды и способы соединения рассмотренных типовых звеньев. При использовании современных технических средств регулирования — микропроцессорных регулирующих контроллеров (МРК) программная реализация типовых звеньев не представляет никакой сложности.

2.7. ТИПОВЫЕ ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Общие сведения. Используемые в настоящее время в промышленном производстве автоматические непрерывные регуляторы и их цифровые аналоги (в микропроцессорных контроллерах) относятся к устройствам функционального непрерывного действия,

что означает наличие непрерывной функциональной связи между входными и выходными параметрами регулятора.

Входными параметрами регулятора являются сигналы, пропорциональные текущим заданному и действительному значениям регулируемого параметра.

В измерительной (входной) схеме регулятора формируется сигнал рассогласования (или ошибки регулирования) в соответствии с условием:

$$\varepsilon(\tau) = x_{з}(\tau) - x_{д}(\tau),$$

где $\varepsilon(\tau)$ — сигнал рассогласования; τ — время; $x_{з}(\tau)$, $x_{д}(\tau)$ — соответственно заданное и действительное текущие значения регулируемого параметра.

Выходной величиной регулятора являются командные импульсы, управляющие работой исполнительного механизма, перемещающего регулирующий орган, поэтому наиболее удобно выходной параметр регулятора оценивать в процентах хода вала исполнительного механизма в пределах допустимого перемещения, ограниченного концевыми выключателями ИМ (0…100 % хода ИМ).

Между входной и выходной величинами регулятора существует определенная функциональная связь, называемая *законом регулирования*. Закон регулирования формируется непосредственно в контуре управления путем использования различных типов обратной связи.

Эффективность работы регулирующего контура при выбранном законе регулирования зависит от значений параметров динамической настройки регулятора, входящих в виде постоянных коэффициентов в уравнения, определяющие закон регулирования.

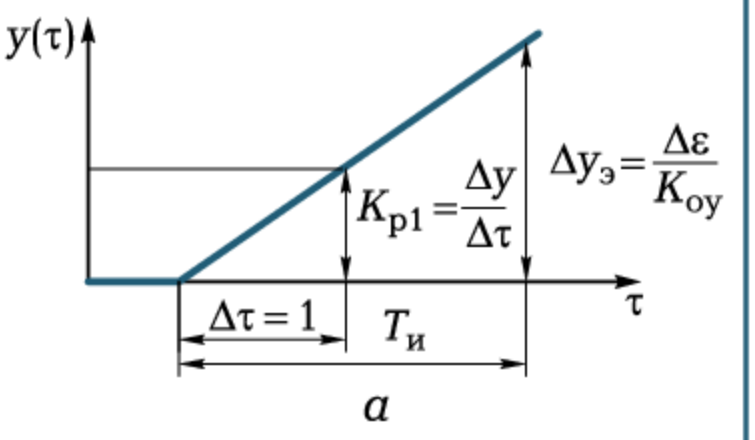
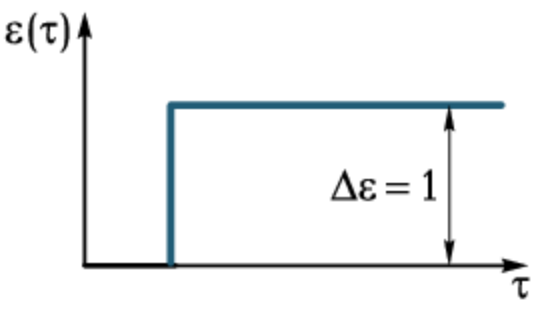
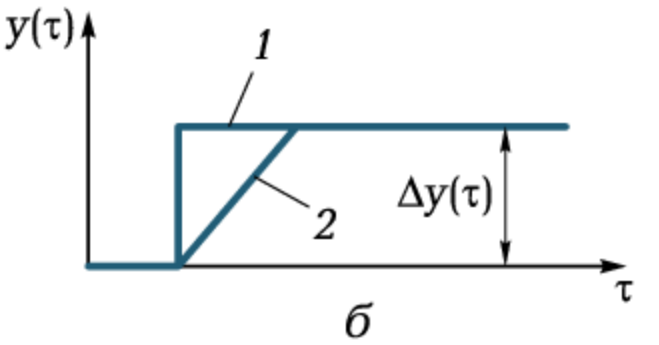
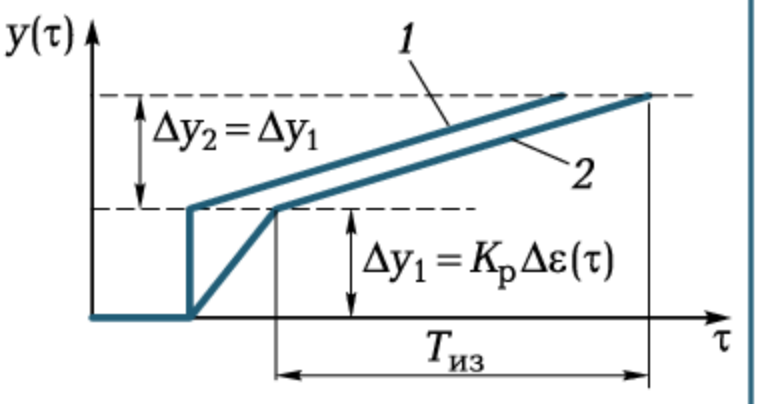
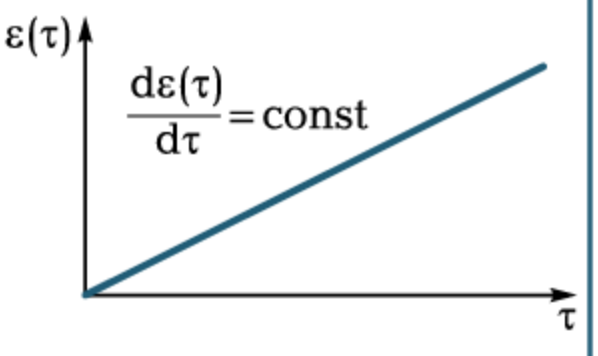
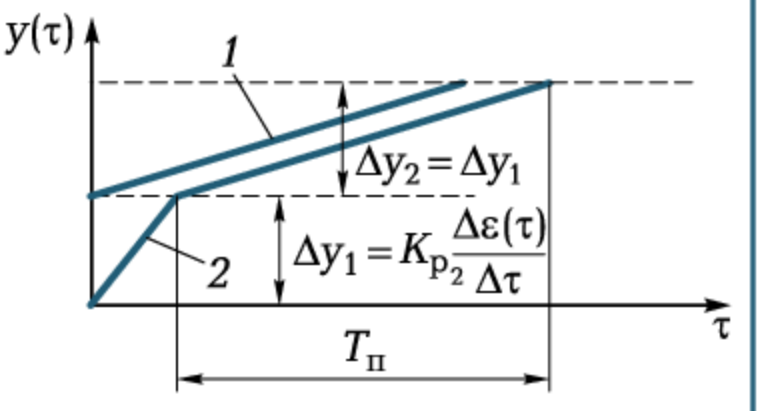
Схемное или программное решение реализации используемого закона регулирования позволяет изменять значения этих коэффициентов в широких пределах.

Динамические параметры настройки регулятора должны соответствовать динамическим параметрам объекта управления.

Правильный выбор коэффициентов настройки регулятора является главной задачей технологической наладки контура управления на реальном производственном объекте.

Реально существующие в производственных условиях контуры управления в соответствии с используемыми в них законами регулирования подразделяют на пять типов: интегральные (И-регуляторы); пропорциональные (П-регуляторы); пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы), пропорционально-дифференциальные (ПД-регуляторы) и пропорционально-дифференциально-интегральные

Таблица 2.5. Переходные характеристики регуляторов

Тип регулятора	Сигнал на входе регулятора	Выходной сигнал регулятора
И-регулятор		 *а*
П-регулятор		 *б*
ПИ-регулятор		 *в*
ПД-регулятор		 *г*

Примечания: *1* — идеальный регулятор; *2* — реальный регулятор

(ПИД-регуляторы). Принцип работы контуров управления рассмотрен для простоты на примере аналоговых контуров (табл. 2.5).

Интегральные регуляторы. Эти регуляторы не имеют обратной связи и реализуют интегральный закон регулирования. Их иногда называют астатическими.

Зависимость между входной и выходной величинами И-регулятора определяется выражением

$$y(\tau) = K_{\text{р1}} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau,$$

или

$$\frac{dy}{d\tau} = K_{\text{р1}} \varepsilon(\tau),$$

где $y(\tau)$ — выходной параметр регулятора (угол поворота вала исполнительного механизма), %.

Отличительной особенностью И-регулятора является выполнение условия: скорость перемещения вала ИМ пропорциональна отклонению регулируемого параметра от задания.

Динамическим параметром настройки И-регулятора является коэффициент передачи $K_{\text{р1}}$, численно равный скорости перемещения выходного вала ИМ, приходящейся на единицу отклонения регулируемого параметра от задания, т. е.

$$K_{\text{р1}} = \frac{\Delta y / \Delta \tau}{\varepsilon(\tau)}. \qquad (2.22)$$

Физический смысл параметра $K_{\text{р1}}$ можно выяснить из анализа траектории переходной (временно́й) характеристики И-регулятора (см. эскиз *а*, табл. 2.5). При $\varepsilon(\tau) = 1$ из (2.22) получим $K_{\text{р1}} = \Delta y / \Delta \tau$, т. е. при $\Delta \tau = 1$ с параметр $K_{\text{р1}}$ численно равен приращению Δy угла поворота вала ИМ в единицу времени, т. е. скорости ИМ.

Но для характеристики интегрирующего эвена обычно используется постоянная времени интегрирования $T_{\text{и}}$.

Для перевода входного параметра И-регулятора $\varepsilon(\tau)$ в физические величины выходного параметра Δy используем выражение:

$$K_{\text{ОУ}} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta y} \text{ или } \Delta y_{\text{э}} = \frac{\Delta \varepsilon}{K_{\text{ОУ}}},$$

где $\Delta y_{\text{э}}$ — эквивалентный параметр; $\Delta \varepsilon$ — угол поворота вала ИМ; $K_{\text{ОУ}}$ — параметр объекта управления.

Отсюда постоянная времени интегрирования $T_{\text{и}}$ также является характеристикой скорости исполнительного механизма и означает время, за которое угол поворота вала исполнительного механизма Δy станет равным эквивалентному углу поворота вала $\Delta y_{\text{э}}$.

Соотношение между $K_{\text{р1}}$ и $T_{\text{и}}$ имеет вид:

$$K_{\text{р1}} = \frac{1}{T_{\text{и}}},$$

т. е. чем больше $T_{\text{и}}$, тем меньше $K_{\text{р1}}$.

Передаточная функция И-регулятора имеет вид:

$$W_{\text{и}}(p) = \frac{1}{T_{\text{и}} p}. \qquad (2.23)$$

Интегральный регулятор работает практически без остаточного отклонения (с учетом зоны нечувствительности используемых технических средств), но достаточно медленно. Повышение быстродействия за счет увеличения $K_{\text{р1}}$ (уменьшения $T_{\text{и}}$) приводит к возникновению колебательного режима работы.

Недостаток И-регулятора состоит в необходимости точного согласования скорости исполнительного механизма с инерционным параметром объекта управления. По этой причине использование И-регуляторов для управления параметрами технологических процессов с электрическими исполнительными механизмами постоянной скорости достаточно проблематично.

Пропорциональные регуляторы. Пропорциональные регуляторы (П-регуляторы) реализуют пропорциональный закон регулирования в соответствии с условием:

$$y(\tau) = K_{\text{р}} \varepsilon(\tau).$$

Отличительной особенностью П-регулятора является условие: угол поворота вала ИМ пропорционален отклонению регулируемого параметра от задания.

Пропорциональный закон реализуется путем использования «жесткой» обратной связи по положению вала исполнительного механизма.

На вход П-регулятора дополнительно подается сигнал с датчика положения вала ИМ (в системах управления технологическими параметрами это обычно индукционный или реостатный датчик).

Пропорциональный регулятор имеет один параметр динамической настройки — коэффициент передачи $K_{\text{р}}$, который численно равен углу поворота вала исполнительного механизма, приходящегося на единицу отклонения регулируемого параметра от задания, т. е. имеет размерность:

$$K_{\text{р}} = \frac{\Delta y}{\Delta \varepsilon} = \frac{\%\ \text{хода ИМ}}{\text{ед. изм. регулируемого параметра}}.$$

Пропорциональный регулятор обеспечивает быстрое, но неточное регулирование. Причиной этого является наличие статической (установившейся) погрешности.

Физический смысл $K_{\text{р}}$ пропорционального закона регулирования и конкретное значение $K_{\text{р}}$, установленное в данном П-регуляторе,

ясны из анализа переходной функции (временно́й характеристики, или кривой разгона П-регулятора), представленной на эскизе *б*, табл. 2.5. Поскольку скорость реальных промышленных исполнительных механизмов постоянна и ограничена, переходные характеристики идеального и реального П-регулятора в начальный момент времени различаются.

Передаточная функция П-регулятора имеет вид:

$$W_{\text{п}}(p) = K_{\text{р}}. \tag{2.24}$$

Недостатком П-регулятора является наличие установившейся ошибки, т. е. неточность управления.

Пропорционально-интегральные регуляторы (ПИ-регуляторы). ПИ-регуляторы иногда называют изодромными или регуляторами с «гибкой» обратной связью. Гибкая обратная связь действует только в период переходного режима и является внутренней обратной связью регулятора. Это самый распространенный в производственных условиях тип регуляторов, сочетающий свойства И- и П-регуляторов и структурно представляющий собой параллельное соединение И-регулятора и П-регулятора.

Зависимость между входной и выходной величинами ПИ-регулятора определяется выражением:

$$y(\tau) = K_{\text{р}}\varepsilon(\tau) + K_{\text{р1}}\int_0^{\tau}\varepsilon(\tau)d\tau$$

или

$$y(\tau) = K_{\text{р}}\left(\varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{\text{из}}}\int_0^{\tau}\varepsilon(\tau)d\tau\right),$$

где $T_{\text{из}} = \dfrac{K_{\text{р}}}{K_{\text{р1}}}$ — время изодрома (характеризует среднюю скорость вращения вала исполнительного механизма под действием интегральной части).

Функциональная связь между временем изодрома $T_{\text{из}}$ и временем интегрирования $T_{\text{и}}$ может быть представлена в виде:

$$T_{\text{из}} = \frac{K_{\text{р}}}{K_{\text{р1}}} = \frac{K_{\text{р}}}{1/T_{\text{и}}} = K_{\text{р}}T_{\text{и}}.$$

Данный регулятор имеет два параметра динамической настройки: настройку пропорциональной части — $K_{\text{р}}$ и настройку интегральной части — $T_{\text{из}}$.

Физическую сущность (количественные оценки) реально установленных на регуляторе значений $K_р$ и $T_{из}$ можно выяснить из траектории экспериментально полученной переходной характеристики (кривой разгона) ПИ-регулятора (см. эскиз *в*, табл. 2.5). Отсюда следует определение времени изодрома $T_{из}$: это время, за которое угол поворота вала исполнительного механизма под действием пропорциональной части $\Delta y_1 = K_р \varepsilon$ удваивается интегральной частью $\Delta y_2 = \Delta y_1$. Поэтому иногда время изодрома $T_{из}$ называют временем удвоения.

Передаточная функция ПИ-регулятора:

$$W_{ПИ}(p) = K_р \frac{1 + T_{из} p}{T_{из} p}, \qquad (2.25)$$

т. е. ПИ-регулятор имеет предваряющую (дифференцирующую) часть $1 + T_{из}p$ в числителе передаточной функции, что делает его эффективным для использования на инерционных объектах.

Пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (ПИД-регуляторы). Регуляторы данного типа называют изодромными с предварением или ПИ-регуляторами с предварением. Они наиболее эффективно используются на объектах управления, подверженных воздействию длительных монотонных возмущений (например, на объектах, имеющих пиковые нагрузки, или в печах прокатных станов с неравномерной производительностью). В этих устройствах реализуется ПИД-закон регулирования, когда при формировании управляющего воздействия учитываются не только величина отклонения и интегральная оценка этой величины, но и скорость изменения этого отклонения.

Зависимость между входной и выходной величинами ПИД-регулятора имеет вид:

$$y(\tau) = K_р \varepsilon(\tau) + K_{р1} \int_0^\tau \varepsilon(\tau) d\tau + K_{р2} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}$$

или

$$y(\tau) = K_р \left(\varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{из}} \int_0^\tau \varepsilon(\tau) d\tau + T_п \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} \right),$$

где $T_п$ — время предварения, параметр настройки дифференцирующей части регулятора, $T_п = K_{р2}/K_р$.

Значение $K_{р2}$ определяет, какой угол поворота вала ИМ приходится на единицу изменения скорости отклонения регулиру-

емого параметра от задания, т. е. $\Delta y = K_{р2}\dfrac{d\varepsilon}{d\tau}$, откуда $K_{р2} = \dfrac{\Delta y/d\tau}{d\varepsilon}$.

Также

$$T_{п} = \frac{K_{р2}}{K_{р}} = \Delta y \frac{\Delta\tau}{\Delta\varepsilon(\tau)} : \frac{\Delta y}{\Delta\varepsilon(\tau)} = \Delta\tau.$$

Время предварения количественно характеризует долю участия дифференцирующей части регулятора в формировании управляющего воздействия ПИД-регулятора.

Физический смысл времени предварения проиллюстрирован на эскизе *г*, табл. 2.5. Допустим, что в ПИД-регуляторе $T_{из} \to \infty$, тогда ПИД-регулятор превращается в ПД-регулятор, так как $1/T_{из} \to 0$. Подадим на вход полученного таким образом ПД-регулятора возмущающее воздействие, изменяющееся с постоянной скоростью $d\varepsilon/d\tau = \text{const}$. Траектории изменения входного $\varepsilon(\tau)$ и выходного $y(\tau)$ параметров регулятора также представлены на эскизе *г* (см. табл. 2.5).

Отсюда следует определение времени предварения $T_{п}$ — это время, за которое угол поворота вала ИМ под действием дифференцирующей части Δy_1 удваивается по отношению к пропорциональной Δy_2, т. е. время, через которое будет соблюдаться условие:

$$\Delta y_1 = \Delta y_2.$$

Передаточная функция реального ПИД-регулятора имеет вид:

$$W_{ПИД}(p) = K_{р}\frac{(1 + T_{из}p)(1 + T_{п}p)}{T_{из}P}. \qquad (2.26)$$

В производственных условиях ПИД-закон регулирования получают при использовании ПИ-регулятора и подачи на его вход дополнительно сигнала с дифференцирующего устройства.

2.8. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ ЛОКАЛЬНОГО КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Общие сведения. Статические и динамические характеристики позволяют находить количественные оценки динамических параметров ОУ, которые необходимо использовать для определения требуемых значений динамических параметров настройки контура

управления в целях получения наилучших показателей переходного процесса в процессе регулирования.

Решение задачи оптимизации настроек контура управления необходимо осуществлять уже на стадии проектирования САУ. Эту задачу целесообразно разбить на два последовательных этапа:

- *структурной оптимизации* — на этом этапе осуществляется выбор закона регулирования для объекта, тип, статические и динамические параметры которого известны;
- *динамической оптимизации*, где определяются динамические параметры настройки контура, обеспечивающие гарантированно устойчивый переходный процесс с наилучшими параметрами.

Структурная оптимизация. В основу структурной оптимизации контура управления положен метод, предложенный Ф. Фрером и Ф. Орттенбургером, позволяющий эффективно и достаточно просто решить поставленную задачу.

Суть метода состоит в компенсации инерционных свойств объекта управления за счет правильного выбора закона управления (регулятора) на этапе структурной оптимизации.

Передаточная функция замкнутого контура при задающем воздействии $W_{ЗК}(\tau)$:

$$W_{ЗК}(p) = \frac{W_0(p)}{1 + W_0(p)} = \frac{1}{1 + \dfrac{1}{W_0(p)}},$$

где $W_0(p)$ — передаточная функция разомкнутой системы (контура управления), которая в свою очередь представляет последовательное соединение двух элементов — регулятора с передаточной функцией $W_р(p)$ и ОУ с передаточной функцией $W_{ОУ}(p)$:

$$W_0(p) = W_р(p) W_{ОУ}(p) = \frac{Z_0(p)}{N_0(p)},$$

где $Z_0(p)$ и $N_0(p)$ — многочлены относительно p.

Тогда передаточная функция замкнутого контура может быть представлена так:

$$W_{ЗК}(p) = \frac{1}{1 + \dfrac{1}{Z_0(p)/N_0(p)}} = \frac{Z_0(p)}{Z_0(p) + N_0(p)}. \qquad (2.27)$$

Реальные промышленные объекты обладают инерционностью. Для передаточной функции инерционного объекта с коэффициентом передачи $K_{ОУ}$ в простейшем случае получим:

$$W_{\text{ОУ}}(p) = \frac{K_{\text{ОУ}}}{T_0 P + 1}.$$

Из вида передаточной функции $W_{\text{ОУ}}(p)$ следует, что для компенсации инерционности с постоянной времени T_0 необходимо иметь регулятор, передаточная функция которого имеет в числителе предваряющую составляющую $(1 + T_{\text{п}}p)$, например ПД-регулятор. Тогда если принять $T_{\text{п}} = T_0$, то в передаточной функции $W_0(p)$ можно сократить $(1 + T_0 p)$ в знаменателе и $(1 + T_{\text{п}}p)$ — в числителе. Такой прием называют *компенсацией инерционности первого порядка.*

Пример. Рассмотрим использование метода компенсации.

Решение. Структурную схему контура управления, включающего последовательное соединение инерционного объекта с передаточной функцией $W_{\text{ОУ}}(p) = \dfrac{K_{\text{ОУ}}}{T_{\text{ОУ}} p + 1}$ и ПД-регулятор с передаточной функцией $W_{\text{р}}(p) = K_{\text{р}}(T_{\text{п}}p + 1)$. В этом случае передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид:

$$W_0(p) = \frac{K_{\text{ОУ}}}{T_{\text{ОУ}} p + 1} K_{\text{р}}(T_{\text{п}} p + 1).$$

При $T_{\text{п}} = T_{\text{ОУ}}$ получим передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W_0(p) = K_{\text{р}} K_{\text{ОУ}}.$$

В реальных условиях T_0 определяется с ошибкой, поэтому эффективность метода компенсации будет зависеть от правильного выбора величины $T_{\text{п}}$.

При правильном выборе величины настройки регулятора (времени предварения $T_{\text{п}}$) инерционные свойства объекта полностью компенсируются предваряющими свойствами регулятора.

Таким образом ПД-(ПИ)-регулятор способен компенсировать одну инерционность, ПИД-регулятор — две инерционности. Причем бóльшая из них компенсируется за счет времени изодрома $T_{\text{из}}$, а меньшая — за счет времени предварения $T_{\text{п}}$.

В каждом ОУ кроме основных инерционностей существует множество других инерционностей, постоянные времени которых неизмеримо малы по сравнению с основными. Суммарное влияние этих инерционностей на процесс управления можно оценить одной эквивалентной постоянной времени

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} \tau_i,$$

где τ_i — малая постоянная времени.

Доказано, что если в структурной схеме объекта управления присутствует интегрирующее или инерционное звено с постоянной времени $T_0 \geq (4...5)\sigma$, то влияние инерционностей практически эквивалентно влиянию переходного запаздывания, т. е. справедливо соотношение:

$$e^{-\tau_з p} = \frac{1}{\sigma p + 1}.$$

Отсюда следует, что при наличии ранее определенного условия передаточную функцию звена «чистого» запаздывания можно без существенного ущерба заменить передаточной функцией инерционного звена с постоянной времени σ.

Динамическая оптимизация. Если известны динамические параметры объекта и его характеристики, то задача динамической оптимизации контура управления заключается в таком выборе настроек регулятора, при которых формируемое регулятором управляющее воздействие обеспечит точное и быстрое (без возникновения колебаний) возвращение регулируемой величины к заданному значению.

Идеального режима контура регулирования можно достигнуть в том случае, если регулируемая величина выхода ОУ $y(\tau)$ будет реагировать на изменение задающего воздействия мгновенно, без запаздывания и появления колебаний, т. е. должно выполняться условие:

$$\frac{y(\tau)}{x_з(\tau)} = 1 \text{ или в операторной форме } \frac{Y(p)}{X_з(p)} = 1.$$

В этом случае регулируемая величина практически не должна реагировать на изменение внешнего возмущающего воздействия x_z, т. е. должно выполняться условие:

$$\frac{y(\tau)}{x_z(\tau)} = 0 \text{ или в операторной форме } \frac{Y(p)}{X_z(p)} = 0.$$

Препятствием для достижения такого идеального поведения контура регулирования является инерционность объекта.

На этапе динамической оптимизации решается следующая задача: *использовать для данного объекта управления такой тип регулятора, динамические параметры которого обеспечивают как можно более полную компенсацию инерционности объекта для получения приемлемых показателей качества переходного процесса.*

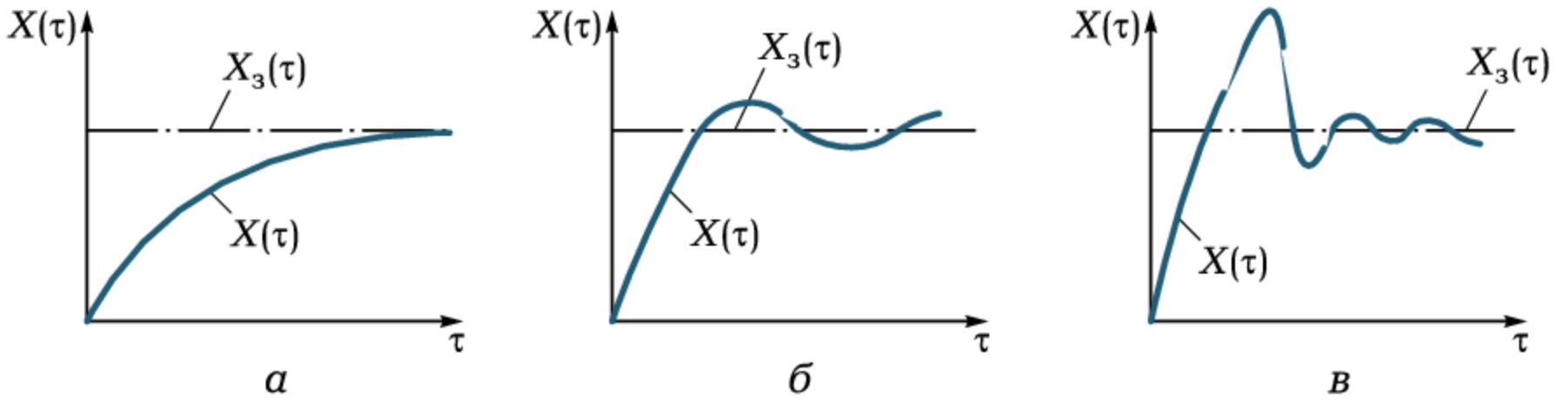


Рис. 2.16. Возможные виды переходных процессов при регулировании

Для оценки качества переходного процесса в контуре регулирования используется переходный процесс, полученный при единичном ступенчатом изменении задания $x_з$.

Возможные виды устойчивых переходных процессов показаны на рис. 2.16, *а*...*в*. Анализ представленных процессов позволяет сделать вывод о том, что с увеличением быстродействия в системе нарастает вероятность возникновения колебательного режима (см. рис. 2.16, *в*). Однако нельзя признать благоприятным и факт медленного приближения регулируемой величины к заданию (затягивание процесса, см. рис. 2.16, *а*). Оптимальным следует считать (см. рис. 2.16, *б*) переходный процесс, обеспечивающий сравнительно быстрый переход от одного заданного значения к другому без существенного перерегулирования или затягивания процесса.

Для обеспечения возможности сравнения различных переходных процессов и количественной оценки их показателей установлены характерные, легко определяемые, величины (см. рис. 2.17):

- первое время регулирования $\tau_{р1}$ — время от момента возмущения до момента, когда регулируемая величина первый раз достигнет нового заданного значения;
- время окончания регулирования $\tau_{р2}$ — процесс регулирования считается законченным, когда регулируемая величина окончательно попадает в зону нового установившегося значения шириной $2\Delta x$, где $\Delta x = 2...2{,}5\,\%$ от вносимого возмущения со стороны задания;
- амплитуда (величина) перерегулирования Δx_{max} — перерегулирование относят к полному изменению регулируемой величины, обусловленному действием скачкообразного воздействия, и выражают в процентах от величины изменения задания $\Delta x_з$.

Если переходный процесс имеет колебательный характер, то в качестве Δx_{max} принимают только первую полуволну перерегулирования.

При динамической оптимизации контура регулирования требуется, чтобы модуль передаточной функции замкнутого контура по возможности быстрее приближался к единице во всем спектре частот по возмущению. Такой прием называют *оптимизацией настройки регулятора путем «пригонки» модуля передаточной функции замкнутой системы к единице.*

На практике обычно приходится иметь дело с контурами управления, передаточные функции (2.27) которых могут быть двух видов:

$$1)\ W_з(p) = \frac{b_0}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2}; \tag{2.28}$$

$$2)\ W_з(p) = \frac{b_0 + b_1 p}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3}, \tag{2.29}$$

где $a_0 = b_0$, $a_1 = b_1$, a_2, a_3 — коэффициенты при соответствующих степенях операторов p.

Если потребовать, чтобы передаточная функция замкнутого контура на всем диапазоне частот была равна единице, т.е. $W_з(p) = 1$, то в контуре необходимо обеспечить соблюдение условий:

$$\boxed{a_1^2 = 2a_0 a_2;} \tag{2.30}$$

$$\boxed{a_2^2 = 2a_1 a_3.} \tag{2.31}$$

Эти условия оптимизации следует использовать только при управлении объектами с самовыравниванием. Очевидно, что точное соблюдение условия пригонки модуля передаточной функции к единице возможно только при $\omega \to 0$.

Пример. Рассмотрим наиболее типичный случай использования ПИ-регулятора для управления инерционным запаздыванием объекта управления с самовыравниванием. Структурная схема контура управления представлена на рис. 2.17, *а*.

Решение. Передаточную функцию разомкнутого контура с ПИ-регулятором можно записать так:

$$W_0(p) = \frac{K_р(T_{из}p + 1)}{T_{из}p} \frac{K_{ОУ}}{T_1 p + 1} \frac{1}{\sigma p + 1}.$$

Для компенсации большей инерционности требуется, чтобы время изодрома $T_{из}$ было равно большей постоянной времени T_1, т.е. $T_{из} = T_1$.

С учетом этого получившаяся передаточная функция замкнутого контура будет иметь вид:

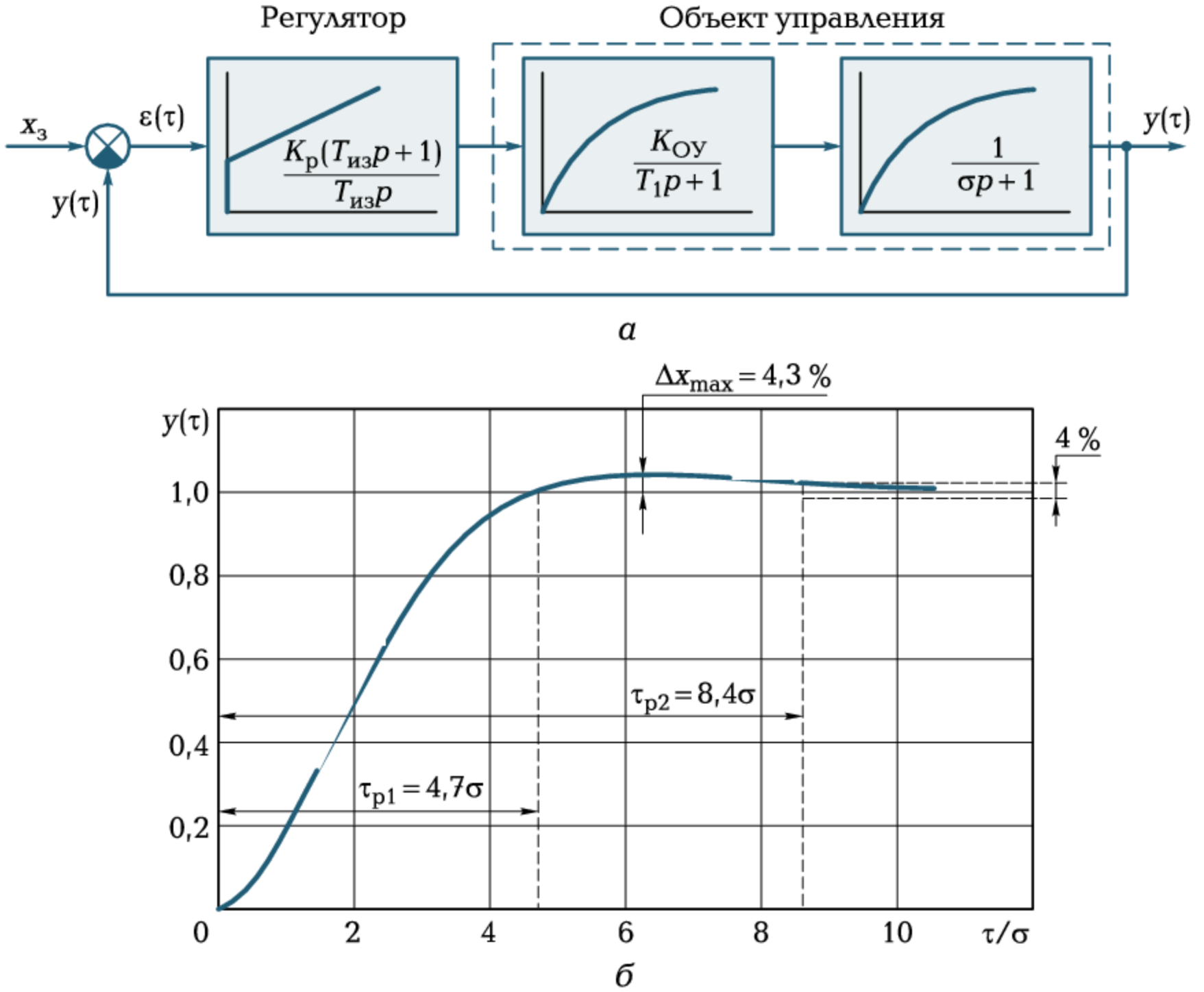


Рис. 2.17. Структурная схема замкнутого контура с ПИ-регулятором и инерционным запаздыванием ОУ (*а*) и типовой переходный процесс в контуре, настроенный по методу пригонки модуля передаточной функции к единице (*б*)

$$W_{ЗК}(p)=\frac{x_р(p)}{x_з(p)}=\frac{W_0(p)}{1+W_0(p)}= \tag{2.32}$$

$$=\frac{K_{ОУ}K_р}{K_{ОУ}K_р+T_{из}p+\sigma T_{из}p^2}=\frac{K_{ОУ}K_р}{K_{ОУ}K_р+T_1p+\sigma T_1p^2}.$$

Передаточная функция (2.32) относится к контуру первого вида. Произведем замену:

$$a_0=K_{ОУ}K_р;\ \ a_1=T_1;\ \ a_2=T_1\sigma.$$

Применим условие пригонки модуля к единице, т. е. $a_1^2=2a_0a_2$, и получим оптимальное значение величины $K_р$:

$$T_1^2=2K_{ОУ}K_рT_1\sigma\Rightarrow$$

$$K_р=\frac{T_1}{2K_{ОУ}\sigma}.$$

Таким образом, параметры настройки ПИ-регулятора для данного типа контура управления будут иметь вид:

$$T_{\text{из}}^{\text{опт}} = T_1;$$

$$K_{\text{р}}^{\text{опт}} = \frac{T_1}{2K_{\text{ОУ}}\sigma},$$

где $\sigma \approx \tau_{\text{з}}$.

Если теперь в выражение для $W_{\text{з}}(p)$ подставить полученные оптимальные значения $T_{\text{из}}^{\text{опт}}$ и $K_{\text{р}}^{\text{опт}}$, то получим передаточную функцию замкнутого контура, параметры которой будут выражены через параметры объекта управления:

$$W_{\text{ЗК}}(p) = \frac{\frac{T_1}{2K_{\text{ОУ}}\sigma}K_{\text{ОУ}}}{\frac{T_1}{2K_{\text{ОУ}}\sigma}K_{\text{ОУ}} + T_1 p + \sigma T_1 p^2} = \frac{T_1/2\sigma}{\frac{T_1}{2\sigma} + T_1 p + \sigma T_1 P^2} =$$

$$= \frac{1}{1 + 2\sigma p + 2\sigma^2 p^2}.$$

Полученная передаточная функция определяет дифференциальное уравнение переходного процесса в контуре при возмущении по заданию следующего вида:

$$2\sigma^2 \frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + 2\sigma \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = x(\tau). \qquad (2.33)$$

При подаче на вход однократного скачкообразного сигнала $x_{\text{з}}(\tau)$ изменение выходного сигнала будет определяться решением дифференциального уравнения (2.33). При нулевых начальных условиях решение уравнения (2.33) будет иметь вид:

$$h(\tau) = 1 - \text{e}^{-\frac{\tau}{2\sigma}}\left(\cos\left(\frac{\tau}{2\sigma}\right) + \sin\left(\frac{\tau}{2\sigma}\right)\right).$$

Траектория переходного процесса в относительном времени $\left(\frac{\tau}{\sigma}\right)$ показана на рис. 2.17, *б*.

Полученный переходный процесс является характерным для данного метода с параметрами $\tau_{\text{р1}} = 4{,}7\sigma$, $\tau_{\text{р2}} = 8{,}4\sigma$, $\Delta x_{\max} = 4{,}3\,\%$.

Приведем еще один пример оптимизации контура регулирования ОУ.

Пример. Рассмотрим структурную и динамическую оптимизацию контура регулирования, структурная схема которого приведена на рис. 2.18.

Решение. Объект управления представлен четырьмя последовательно соединенными инерционными звеньями первого порядка, имеющими следующие параметры: $T_1 = 40$ с, $T_2 = 10$ с, $T_3 = 1{,}5$ с, $T_4 = 0{,}5$ с.

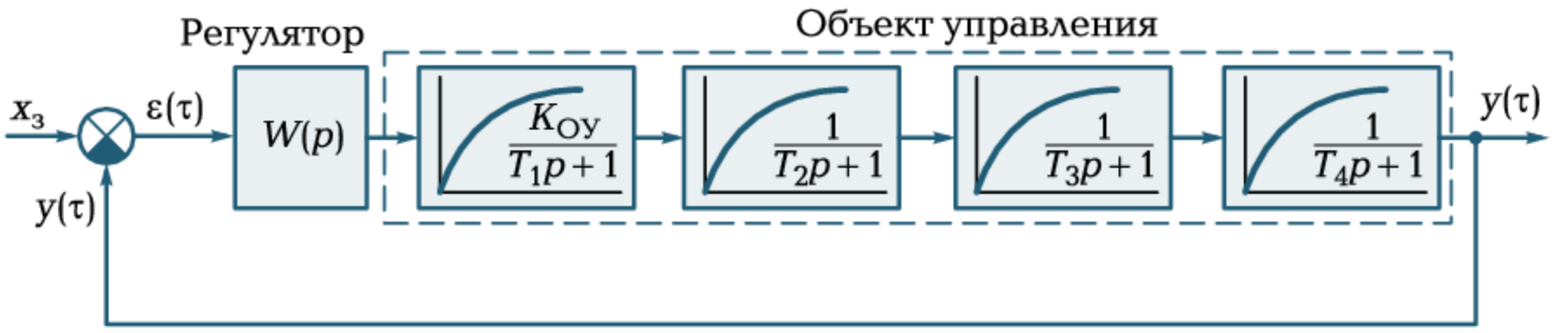


Рис. 2.18. Структурная схема контура регулирования с инерционным объектом для сравнительной оценки показателей качества переходного процесса при различных законах регулирования

Передаточная функция объекта управления в этом случае имеет вид:

$$W_0(p) = \left(\frac{K_{ОУ}}{T_1p+1}\right)\left(\frac{1}{T_2p+1}\right)\left(\frac{1}{T_3p+1}\right)\left(\frac{1}{T_4p+1}\right).$$

Необходимо провести выбор регулятора и определить его оптимальные настройки. Остаточное отклонение в конце переходного процесса недопустимо.

Рассмотрим применение различных типов регуляторов и определим параметры полученных переходных процессов.

1. Используем для управления И-регулятор. В этом случае все инерционности следует считать достаточно малыми и оптимальное значение времени интегрирования $T_и$ будет составлять: $T_и = 2K_{ОУ}\sigma = 2K_{ОУ}(40 + 10 + 1{,}5 + 0{,}5)$. В этом случае первое время регулирования $\tau_{р1}^{и} = 4{,}7 \cdot 52 = 244$ с.

2. Для повышения быстродействия контура добавим пропорциональную часть и получим ПИ-регулятор. Для компенсации наибольшей инерционности принимаем $T_{из} = T_1 = 40$ с. Тогда величина настройки регулятора $K_р$ определится так:

$$K_р = \frac{40}{2K_{ОУ}\sigma} = \frac{40}{2K_{ОУ} \cdot 12} = \frac{5}{3K_{ОУ}}.$$

При использовании ПИ-регулятора первое время регулирования $\tau_{р1}^{ПИ} =$

$= 4{,}7\sigma = 4{,}7(10 + 1{,}5 + 0{,}5) = 56{,}4$ с.

3. Для повышения оперативности управления добавим дифференцирующую часть и получим ПИД-регулятор. Параметры настройки ПИД-регулятора составят: $T_{из} = 40$ с, $T_п = T_2 = 10$ с. При данных настройках первое время регулирования $\tau_{р1}^{ПИД} = 4{,}7\sigma = 4{,}7 \cdot 2 = 9{,}4$ с.

Компенсировать другие постоянные времени незначительной величины с использованием закона ПИД^2 при добавлении дополнительных дифференцирующих элементов не рекомендуется, так как независимая настройка параметров регулятора очень затруднена или практически невозможна.

2.9. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ КОНТУРОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ БЕЗ САМОВЫРАВНИВАНИЯ

Если динамические свойства ОУ определяют его астатические свойства, т. е. объект не обладает свойствами самовыравнивания, то компенсация одной или двух самых существенных инерционностей не может дать необходимого результата, поскольку в данном случае интегральному звену объекта противопоставляется интегральная составляющая в законе регулирования.

Оптимизацию динамических параметров контура регулирования ОУ без самовыравнивания необходимо осуществлять не методом оптимума по модулю передаточной функции, а *методом симметричного оптимума*. В данном случае также следует добиваться «пригонки» модуля передаточной функции к единице, используя другие условия оптимизации.

Для определения этих условий рассмотрим объект, содержащий интегрирующее звено и некоторое число включенных последовательно инерционностей первого порядка при условии использования ПИ-регулятора. Структурная схема рассматриваемого контура представлена на рис. 2.19, *а*.

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_0(p) = \frac{K_{\text{р}}(T_{\text{из}}p+1)}{T_{\text{из}}p}\frac{1}{T_0 p}\frac{K_{\text{об}}}{\sigma_1 p+1} = \frac{K_{\text{р}}K_{\text{об}}}{T_{\text{и}}p(\sigma p+1)},$$

где $\sigma = \sum_{i=1}^{n} T_i$ (T_i — малые постоянные времени последовательного включения инерционностей первого порядка).

Компенсация всех входящих в объект инерционностей с использованием ПИ- или ПИД-закона регулирования невозможна.

Выражение для передаточной функции замкнутого контура, которая представляет собой контур второго вида, будет соответствовать выражению (2.29), т. е. передаточной функции второго вида:

$$W_{\text{з}}(P) = \frac{y(p)}{x_{\text{з}}(p)} = \frac{W_0(p)}{1+W_0(p)} =$$

$$= \frac{K_{\text{р}}K_{\text{об}}(T_{\text{из}}p+1)}{\left(K_{\text{р}}K_{\text{об}} + K_{\text{р}}K_{\text{об}}T_{\text{из}}P + T_{\text{из}}T_0p^2 + T_{\text{из}}T_0\sigma p^3\right)}.$$

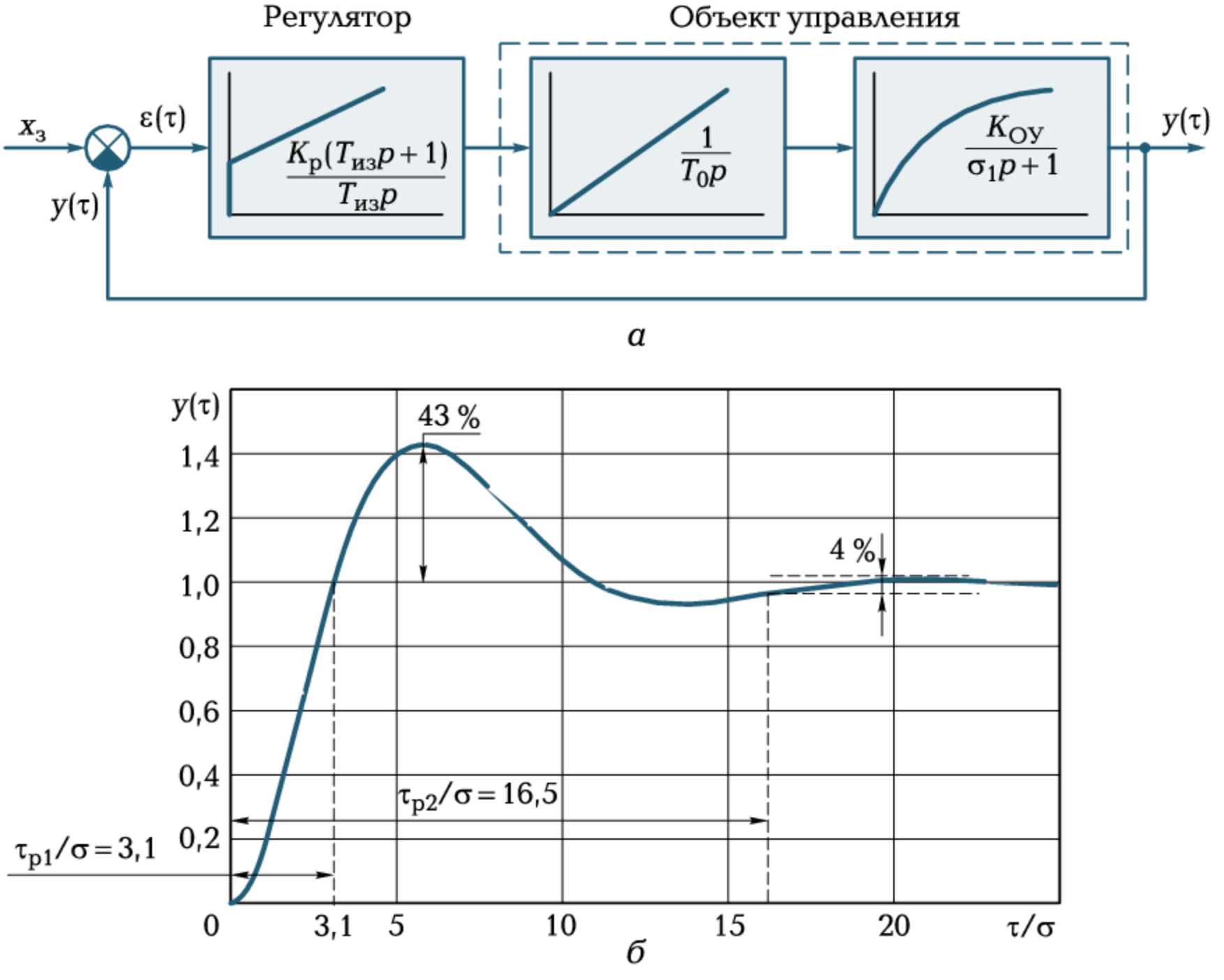


Рис. 2.19. Структурная схема контура управления инерционным объектом, имеющим интегральные свойства (*а*), и переходный процесс в контуре (*б*)

При $b_0 = a_0$ и $b_1 = a_1$ имеем: $a_0 = K_р K_{об}$; $a_1 = K_р K_{об} T_{из}$; $a_2 = T_0 T_{из}$; $a_3 = T_0 T_{из}\sigma$.

По условию оптимизации $a_1^2 = 2a_0a_2$ получим:

$$K_р^2 K_{об}^2 T_{из}^2 = 2K_р K_{об} T_{из} T_0, \text{ или } 2T_0 = K_{об} K_р T_{из},$$

откуда

$$K_р = \frac{2T_{об}}{K_{об} T_{из}}. \qquad (2.34)$$

Из условия оптимизации $a_2^2 = 2a_1a_3$ имеем:

$$T_{из}^2 T_0 = 2K_р K_{об} T_{из} T_0 T_{из}\sigma,$$

и после преобразования получим: $T_0 = 2K_р K_{об}\sigma$.

Сравнивая значения T_0 из первого и второго условия оптимизации, приходим к равенству:

$$K_{\text{р}}K_{\text{об}}\frac{T_{\text{из}}}{2}=2K_{\text{р}}K_{\text{об}}\sigma \text{ или } \frac{T_{\text{из}}}{2}=2\sigma,$$

откуда время изодрома $T_{\text{из}}=4\sigma$.

Подставив значение $T_{\text{из}}$ в выражение (2.34) для определения $K_{\text{р}}$, имеем:

$$K_{\text{р}}=\frac{T_0}{2K_{об}\sigma}.$$

Если подставить полученные значения $T_{\text{из}}$ и $K_{\text{р}}$ в уравнение $W_{\text{з}}(P)$ (2.29), то придем к типовому выражению передаточной функции замкнутой системы при использовании настройки ПИ-регулятора для управления инерционным астатическим объектом:

$$W_{\text{з}}(P)=\frac{(1+4\sigma)}{\left(1+4\sigma P+8\sigma^2P^2+8\sigma^3P^3\right)}. \qquad (2.35)$$

Из полученного выражения передаточной функции видно, что при использовании метода симметричного оптимума поведение контура зависит только от суммы постоянных времени σ.

Траектория переходного процесса во времени в контуре, параметры которого оптимизированы по методу симметричного оптимума, определяется из решения дифференциального уравнения, соответствующего передаточной функции (2.35):

$$4\sigma\frac{dx_{\text{з}}(\tau)}{d\tau}+x_{\text{з}}(\tau)=y(\tau)+4\sigma\frac{dy(\tau)}{d\tau}+8\sigma^2\frac{d^2y(\tau)}{d\tau^2}+8\sigma^3\frac{d^3y(\tau)}{d\tau^3}.$$

В результате решения этого типового уравнения получим траекторию переходного процесса, описываемую уравнением

$$y(\tau)=1+\text{e}^{-\frac{\tau}{2\sigma}}-2\text{e}^{-\frac{\tau}{4\sigma}}\cos\left(\frac{\tau\sqrt{3}}{4\sigma}\right).$$

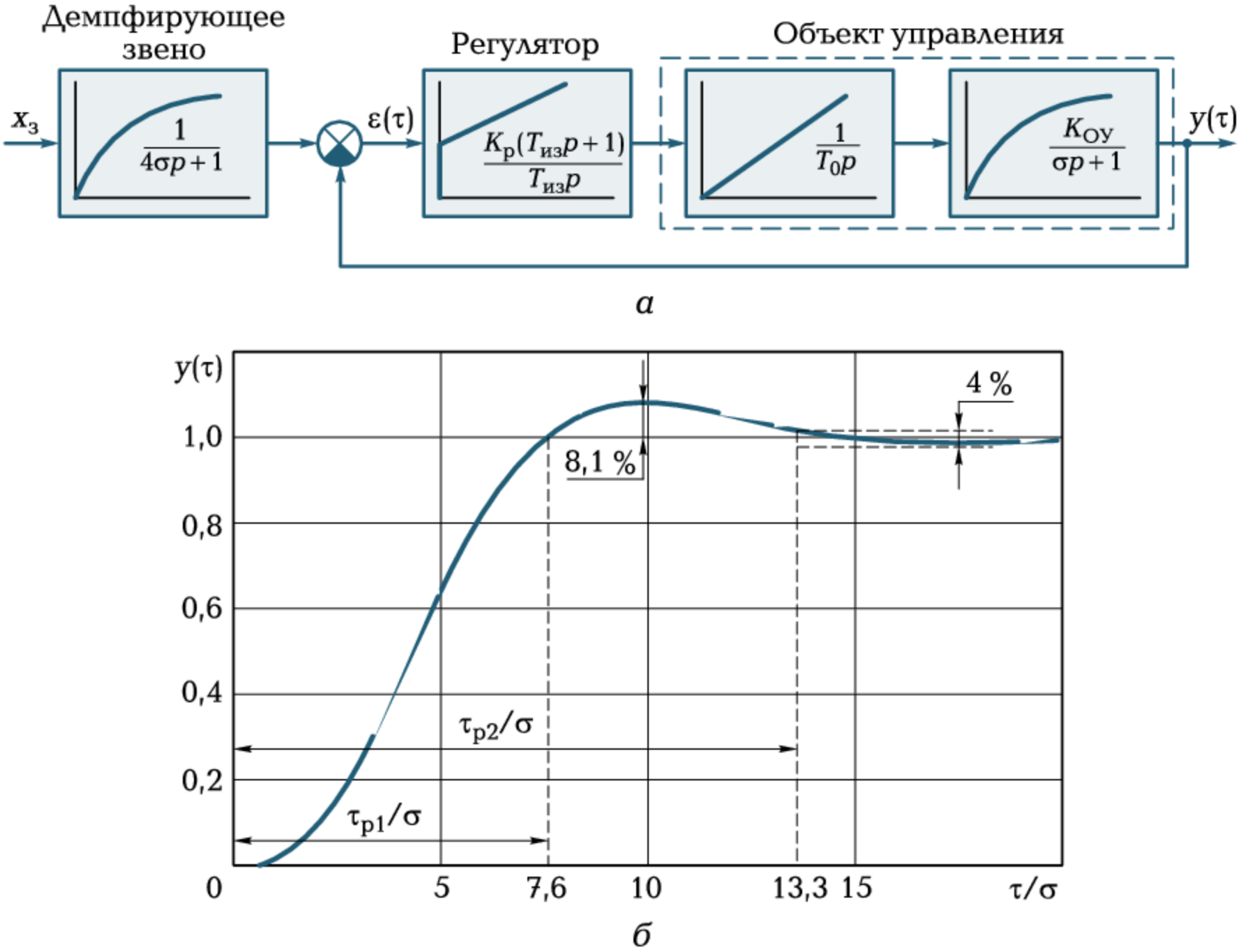
Уравнение определяет переходный процесс с параметрами $\tau_{\text{р}1}=3{,}1\sigma$, $\tau_{\text{р}2}=16{,}5\sigma$, $\Delta x_{\max}=43\,\%$, который является типовым для контуров управления объектами без самовыравнивания и ПИ-регулятором с настройками, определенными по методу симметричного оптимума. График переходного процесса в координатах $y(\tau)-\left(\frac{\tau}{\sigma}\right)$ приведен на рис. 2.19, *б*.

Использование ПИД-регулятора позволяет в этом случае компенсировать наибольшую инерционность в значении $\sigma=\sum_{i=1}^{n}T_i$.

Величина перерегулирования $\Delta x_{max} = 43\,\%$, характерная для контура, настройки которого оптимизированы по методу симметричного оптимума, достаточно велика. Это объясняется наличием в числителе передаточной функции $W_з(\tau)$ упреждающего элемента с передаточной функцией $W(p) = 4\sigma p + 1$, из-за наличия которого контур управления реагирует не только на величину изменения $x_з$, но и на скорость изменения задания.

Для устранения этого негативного фактора целесообразно задающий сигнал пропустить через инерционное звено с передаточной функцией $W_{г.з}(p) = \dfrac{1}{4\sigma p + 1}$ и компенсировать нежелательное упреждение задающего воздействия $x_з$.

При условии демпфирования (сглаживания) задающего сигнала структурная схема контура управления будет иметь вид, представленный на рис. 2.20, *а*.



а

б

Рис. 2.20. Структурная схема контура управления астатическим объектом с демпфирующим элементов на входе (*а*) и переходный процесс в системе с демпфированием задающего воздействия (*б*)

Передаточная функция контура регулирования в этом случае можно представить в виде:

$$W_{\text{зд}}(p) = W_{\text{г.з}}(p)W_{\text{з}}(p) = \frac{1}{4\sigma p + 1} \cdot \frac{4\sigma p + 1}{\left(1 + 4\sigma p + 8\sigma^2 p^2 + 8\sigma^3 p^3\right)}.$$

При этом из-за сокращения числителя следует ожидать увеличения значения времени регулирования $\tau_{\text{р1}}$. Этой передаточной функции соответствует дифференциальное уравнение, определяющее траекторию переходного процесса

$$y(\tau) + 4\sigma\frac{dy(\tau)}{d\tau} + 8\sigma^2\frac{d^2y(\tau)}{d\tau^2} + 8\sigma^3\frac{d^3y(\tau)}{d\tau^3} = x_{\text{з}}.$$

Решение этого уравнение при нулевых начальных условиях будет иметь вид:

$$y(\tau) = 1 - e^{-\frac{\tau}{2\sigma}} - \frac{2}{\sqrt{3}}\left(e^{-\frac{\tau}{4\sigma}}\sin\frac{\tau\sqrt{3}}{4\sigma}\right).$$

График переходного процесса в координатах $y(\tau) - \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)$ представлен на рис. 2.20, *б*. Параметры переходного процесса будут иметь значения ($\tau_{\text{р1}} = 7{,}6\sigma$; $\tau_{\text{р}} = 13{,}3\sigma$; $\Delta x_{\max} = 8{,}1\ \%$), характерные для контура, настройки которого оптимизированы по методу симметричного оптимума и при условии использования сглаживания задающего воздействия.

Рассмотренные методы оптимизации параметров настройки стабилизирующих контуров управления позволяют получить гарантированно устойчивые режимы регулирования. При таких параметрах настройки исследование САУ на устойчивость не проводится.

Простота и эффективность методов настройки регулятора путем пригонки модуля частотной характеристики к единице очевидна и безусловно полезна для применения в реальных условиях, поскольку имеет преимущество перед другими методами.

Глава 3

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

3.1. ПОНЯТИЕ О КОМПЛЕКСАХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРИБОРОВ

Управление технологическим процессом возможно на основании получаемой информации о его состоянии и ходе. Разнообразие технологических процессов различных отраслей промышленного производства обусловило необходимость получения информации о большом числе технологических параметров. Проведенные в начале 1970-х годов Институтом проблем управления исследования по оценке размеров области такой информации позволили создать кадастр величин, подлежащих измерению. Кадастр содержит свыше 2 тыс. наименований величин, разделенных на восемь групп по отраслям промышленности и сельского хозяйства (табл. 3.1).

Кадастр — это систематизированный свод сведений, составляемый периодически или путем непрерывных наблюдений над соответствующими объектами. Он объединяет физические величины, которые определяют состояние технологических объектов управления различных отраслей. К ним относятся величины пространства и времени, механические, электрические, магнитные, акустические, световые, а также относительные.

Кадастр определяет перспективы развития номенклатуры средств измерений — датчиков технологических процессов. Многообразие измеряемых технологических параметров требует их систематизации и унификации.

Рациональное сокращение номенклатуры технических средств автоматизации и их конструктивных элементов и узлов достигается на основе последовательного применения агрегатных способов построения снизу вверх, начиная от конструирования простейших

Таблица 3.1. Структура кадастра измеряемых величин

Группа величин	Наименование величины
Пространства и времени	Площадь
	Объем
	Время
	Скорость
	Ускорение
	Частота
	Плоский угол
Акустические	Звуковое давление
	Интенсивность звука
Механические	Масса
	Плотность
	Удельный объем
	Сила
	Момент
	Давление
	Энергия
	Мощность
	Вязкость
	Расход (объемный)
	Расход (массовый)
Ядерных реакций и радиоактивных излучений	Доза излучения
	Поток излучения
Электрические и магнитные	Ток
	Количество электричества
	Плотность тока
	Электрическое напряжение

Продолжение табл. 3.1

Группа величин	Наименование величины
Электрические и магнитные	Напряженность электрического поля
	Емкость
	Диэлектрическая проницаемость
	Электрическое сопротивление
	Магнитный поток
	Магнитная индукция
	Индуктивность
	Активная мощность
	Коэффициент мощности
	Частота
	Магнитный потенциал
	Электромагнитная энергия
	Мощность реактивная
	Углы фазовых сдвигов
	ТермоЭДС
	Разность фаз
Тепловые	Температура
	Количество теплоты
	Теплоемкость
	Удельная теплоемкость
	Коэффициент теплоотдачи
	Тепловой поток
	Теплопроводность
	Коэффициент теплопроводности
	Температурный коэффициент
	Термическое сопротивление
Световые	Освещенность

Окончание табл. 3.1

Группа величин	Наименование величины
Световые	Яркость
	Оптическая плотность
	Отражение и дифракция
	Рассеяние света
Относительные	Коэффициент трения
	КПД
	Состав промышленных продуктов
	Содержание продуктов
	Концентрация
	pH
	Кислотность
	Цветность
	Влажность

функциональных блоков и заканчивая проектированием сложных автоматизированных систем управления.

Научные основы конструирования системы приборов, базирующиеся на агрегатном принципе построения, впервые были определены академиком В. А. Трапезниковым в начале 1950-х годов. В конце 50-х годов была сформулирована проблема создания единой Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП), представляющей собой рационально организованную совокупность приборов и устройств, удовлетворяющих принципам агрегирования и предназначенных для построения автоматизированных систем измерения, контроля, регулирования и управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности.

В 1960-е годы были разработаны научные основы построения структуры ГСП, принципы совместимости приборов и устройств. В это же время были обоснованы и определены значения унифицированных пневматических и электрических аналоговых сигналов связи. В 1990-е годы был разработан комплекс стандартов ГСП, в том числе ГОСТ 12997—84 «Изделия ГСП. Общие технические

условия», закрепивший законодательно структуру и основные принципы построения ГСП:

- возможность сведения многообразия функций автоматического контроля, регулирования и управления к ограниченному числу типовых функций;
- минимизация номенклатуры технических средств на основе создания агрегатных комплексов технических устройств и параметрических рядов приборов;
- построение технических средств (приборов и устройств) на основе типовых унифицированных блоков и модулей;
- агрегатное построение сложных систем управления на основе типовых унифицированных приборов и устройств (блочно-модульный принцип);
- совместимость приборов и устройств ГСП при работе за счет унификации сигналов связи, используемых для обмена между изделиями ГСП (информационная совместимость), конструкций и присоединительных размеров (конструктивная совместимость), метрологических характеристик средств измерения и обеспечения на этой основе рационального построения измерительных цепей в системах (метрологическая совместимость).

Аналогичная унификация технических средств производилась и в других странах, входящих в состав Международной универсальной системы автоматического контроля, регулирования и управления — УРС (СТ СЭВ 4702-84).

Все изделия ГСП выпускаются в виде агрегатных комплексов технических средств (под агрегатным комплексом понимается совокупность изделий, связанных по функциональному назначению и имеющих общие конструктивные и технические характеристики).

Агрегатные комплексы технических средств, входящие в ГСП, разрабатываются с соблюдением стандартов, регламентирующих требования к общим техническим характеристикам (точности, быстродействию, надежности, климатическим условиям работы) и нормирующих параметры входных и выходных сигналов (аналоговых — с модуляцией различных параметров и цифровых), унифицирующих элементы конструкций, в частности ГОСТ 26032—83 «Система унифицированных типовых конструкций агрегатных комплексов ГСП. Общие технические условия».

Изделия агрегатных комплексов разрабатываются в виде функционально-параметрических рядов, которые охватывают требуемый диапазон измерений в различных условиях эксплуатации. Благодаря этому исключается необходимость создания других

изделий данного функционального назначения, входящих в соответствующий агрегатный комплекс.

Примерами отечественных агрегатных комплексов технических средств являются: РЕМИКОНТ — регулирующий микропроцессорный контроллер; КОНТРАСТ; КРОСС — контроллер распределенных открытых систем; ОВЕН.

Из зарубежных агрегатных комплексов технических средств широко распространены продукты под торговой маркой Simatic, выпускаемые фирмой Siemens.

Для совместимости приборов и устройств, входящих в ГСП, используют следующие унифицированные характеристики:

- информационные сигналы;
- метрологические, энергетические и конструктивные;
- математические и программные средства.

Пример. Поясним значение нормирования параметров входных и выходных сигналов в ГСП. Широкое распространение получил унифицированный сигнал постоянного тока с диапазоном значений от 0 до 5 мА. Если в данном агрегатном комплексе технических средств принят такой сигнал, то это означает, что независимо от вида измеряемого параметра и диапазона его значений ($x_{min} \dots x_{max}$) ему соответствует на выходе нормирующего преобразователя диапазон сигналов постоянного тока от 0 до 5 мА. При этом сигнал не должен изменяться при изменении сопротивления нагрузки на выходе нормирующего преобразователя в диапазоне от 0 до 2,5 кОм.

Установив на выходе нормирующего преобразователя резистор сопротивлением, например 1 кОм, можно привести сигналы по всем каналам к общему диапазону от 0 до 5 В и именно на этот диапазон спроектировать АЦП.

Нормирующие преобразователи с выходным сигналом в виде унифицированного тока можно размещать на значительном расстоянии от приемника сигнала и АЦП — до нескольких километров. В этом случае сопротивление подводящих проводов не будет влиять на точность измерения. Такое влияние будет заметным при удалении на расстояние более 10 км.

Введение унифицированных сигналов в практику приборостроения привело к необходимости производства датчиков с унифицированным выходным сигналом. В таких устройствах объединяют в одном блоке первичный измерительный преобразователь и нормирующий преобразователь.

Устройства ГСП по функциональному признаку можно разделить на три группы:

- датчики и первичные измерительные преобразователи, предназначенные для получения информации об объекте управления;

- устройства так называемой центральной части — для преобразования информации в целях формирования управляющих воздействий;
- устройства реализации управляющих воздействий.

Конструирование устройств ГСП осуществляется по блочно-модульному принципу построения изделий, который заключается в том, что функционально более сложные устройства ГСП создаются из ограниченного числа более простых стандартизированных блоков и модулей.

Применение этого принципа при построении изделий ГСП делает приборы универсальными, позволяет использовать при их создании рациональный минимум конструктивных элементов (сокращается номенклатура деталей), обеспечивает взаимозаменяемость приборов в целом и отдельных их узлов, значительно упрощает и снижает стоимость ремонта приборов, который в большинстве случаев сводится к замене вышедших из строя типовых узлов и модулей.

Реализация блочно-модульного принципа дает возможность создавать новые средства измерения и регулирования из существующего набора узлов и блоков, что сокращает сроки разработки и внедрения новых изделий.

Как уже отмечалось, номенклатура технических средств ГСП насчитывает в настоящее время свыше 2 тыс. изделий, 30 % которых составляют датчики физических величин и технологических параметров. С увеличением сложности функций действующих систем управления и расширения области их применения, охватывающей новые производства, номенклатура технических средств ГСП, и в первую очередь датчиков, постепенно расширялась.

При совершенствовании номенклатуры необходимо соблюдать принцип рациональной минимизации, одним из основных методов которой является разработка параметрических рядов изделий на базе системы предпочтительных чисел. Параметрический ряд — совокупность изделий одинакового функционального назначения, имеющих одни и те же основные параметры, для которых изменение значений главного параметра при переходе от предыдущего числа ряда к последующему подчиняется определенным закономерностям. Первыми параметрическими рядами в ГСП по системе предпочтительных чисел явились ряды унифицированных пневматических и электрических датчиков.

Методика построения параметрического ряда изделий ГСП состоит в выборе основных параметров приборов и устройств, подлежащих регламентации, выделении главного параметра из их числа

и установлении наиболее рационального размерного ряда приборов по главному параметру. При этом преимущественно применяются ряды, построенные на основе геометрической прогрессии, с числовыми значениями, соответствующими ГОСТ 8032—84 «Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел».

В настоящее время разработаны параметрические ряды (подчиняющиеся законам геометрической или другой последовательности) преобразователей давления, расхода, уровня, температуры электроизмерительных приборов.

Пример. Рассмотрим ряд R40, состоящий из следующей последовательности чисел: 1; 1,06; 1,12; 1,18; 1,25; 1,32; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2; 2,12; 2,24; 2,36; 2,5; 2,65; 2,8; 3; 3,15; 3,35; 3,55; 3,75; 4; 4,25; 4,5; 4,75; 5; 5,3; 5,6; 6; 6,3; 6,7; 7,1; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10. (Подчеркнутые значения принадлежат также и ряду R5.) Остальные значения получаются при умножении числа ряда на значения целой степени числа 10.

Известно, что производство и эксплуатация приборов предъявляют противоречивые требования к «густоте» параметрического ряда (количеству типоразмеров в ряду). С одной стороны, увеличение типоразмеров усложняет производство приборов и повышает их стоимость, с другой — уменьшение количества типоразмеров снижает точность систем контроля и автоматизации и приводит к избыточности применяемых средств. Отсюда возникает задача оптимизации параметрических рядов изделий ГСП, основу которой составляет анализ и учет совокупности технико-экономических данных, таких как потребность промышленного производства в приборах, зависимость потребности и затрат от основных параметров приборов, зависимость стоимости от серийности и другие факторы. В качестве критерия оптимальности может выступать минимум суммарных затрат на удовлетворение заданных потребностей, что является следствием анализа противоречия между интересами изготовителя (затраты на производство) и потребителя (затраты на эксплуатацию).

При сокращенном ряде приборов у изготовителя снижаются затраты на освоение, увеличивается серийность выпускаемых изделий, что обеспечивает значительную экономию материалов. Увеличение «густоты» ряда приводит к экономии у потребителя за счет более точного соблюдения технологического регламента производственного процесса.

Таким образом, оптимальным параметрическим рядом можно считать ряд одинаковых по функциональному назначению технических средств, упорядоченных по основным параметрам и опти-

мальных в смысле принятого критерия. При этом необходимо отметить, что оптимальный параметрический ряд необязательно должен строго подчиняться законам геометрической или другой последовательности. Исследования показали, что оптимальные ряды некоторых изделий значительно экономичнее рядов, построенных по системе предпочтительных чисел.

3.2. НАЗНАЧЕНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДАТЧИКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Принципы измерения неэлектрических величин. Комплексная автоматизация производства и измерений связана с получением данных о значении различных физических величин, характеризующих состояние объекта управления (исследования), — механических, тепловых, химических, оптических и других, которые принято называть неэлектрическими. Особенно большое число неэлектрических величин требуется измерять и контролировать в металлургической и химической отраслях экономики.

Развитие измерительной техники показало, что среди многочисленных методов измерений неэлектрических величин наибольшими преимуществами обладают электрические методы, позволяющие обеспечить:

- возможность измерения сигналов очень малой величины — применение электронных усилителей позволяет измерять такие сигналы, которые не могут быть измерены никакими другими способами;
- возможность передачи измеренной величины на расстояние, а следовательно, и возможность дистанционного управления различными процессами;
- высокую точность и скорость измерений, удобство в эксплуатации измерительных приборов, легкость в исполнении (проектировании, производстве);
- возможность создания унифицированных измерительных установок.

В любом измерительном устройстве при измерении неэлектрической величины (температуры, давления, расхода, скорости и т. д.) происходит ее преобразование с помощью первичного измерительного преобразователя в выходной электрический сигнал, проходящий через цепь измерительных преобразователей прибора, где

претерпевает ряд изменений по уровню, спектру и виду энергии. В итоге получается число (код), определяющее значение измеряемой величины в требуемых единицах измерения.

Обязательное условие измерительного преобразования — сохранение в выходной величине информации о количественном значении измеряемой величины. Измерительное преобразование — единственный способ построения любых измерительных устройств. Отличие измерительных преобразователей от других видов преобразователей — способность осуществлять преобразования с установленной точностью. Концепция представления измерительных устройств как устройств, осуществляющих ряд последовательных преобразований от восприятия измеряемой величины до получения результата измерения, первоначально была выдвинута в нашей стране М. Л. Цукерманом и окончательно сформулирована применительно к измерению неэлектрических величин Ф. Е. Темниковым и Р. Р. Харченко (1948). В 1960-х годах эта концепция стала общепризнанной во всех областях измерительной техники, приборостроения и метрологии.

В общем случае устройство для измерения неэлектрических величин можно представить структурной схемой, представленной на рис. 3.1.

В качестве отсчетного устройства обычно используется электроизмерительный показывающий прибор. В отдельных случаях результат измерения представляется в цифровой форме (кодируется).

Кроме термина «первичный измерительный преобразователь» для обозначения элемента, преобразующего неэлектрическую величину в электрическую, применяют термин «датчик неэлектрической величины» или просто «датчик». В иностранной литературе датчик обозначают как «sensor» — сенсор.

К первичным измерительным преобразователям предъявляют требования воспроизводимости и однозначности характеристики преобразования $y = f(x)$, стабильности ее во времени, минимального обратного действия преобразователя на исследуемый объект, точности быстродействия и др. Первичные измерительные преобразова-

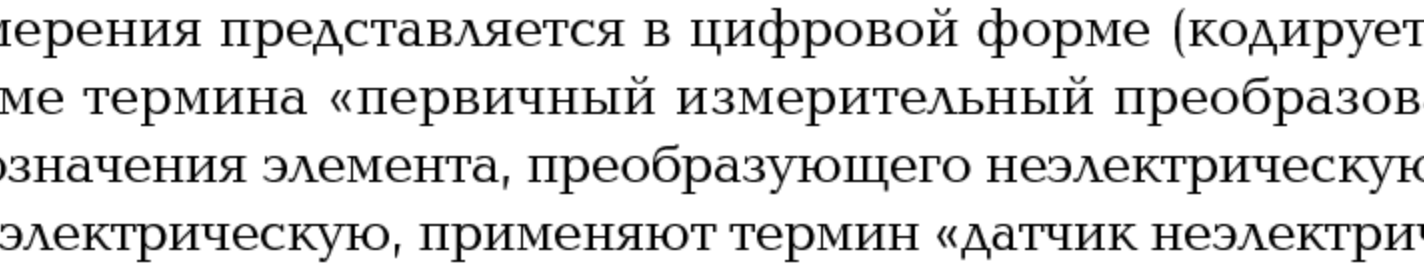


Рис. 3.1. Структура устройства для измерения неэлектрических величин

тели весьма разнообразны по принципу действия, устройству, виду энергии входного сигнала, метрологическим и эксплуатационным характеристикам.

Цепь измерительных преобразователей включает в себя промежуточные и унифицированные измерительные преобразователи.

Промежуточный измерительный преобразователь получает сигнал измерительной информации от предыдущего преобразователя и передает его после преобразования последующему преобразователю. Например, широко используемые в измерительных приборах цепи гальванической развязки — промежуточные преобразователи, устраняющие прямую электрическую связь между входом и выходом измерительного прибора.

Унифицированный измерительный преобразователь позволяет преобразовать сигнал первичного измерительного преобразователя в нормированную выходную величину. Такие преобразователи также называют нормирующими.

Основные характеристики измерительных преобразователей. Рассмотрим основные характеристики измерительных преобразователей.

Статическая характеристика (функция) преобразования — это связь, выражающая зависимость выходного сигнала от постоянного по времени входного сигнала, которую можно описать аналитически или графически. В аналитическом виде характеристика преобразования представляется линейной или нелинейной зависимостью $y = f(x)$. Различают номинальную функцию преобразования, устанавливаемую для измерительного преобразователя ГОСТами, техническими условиями и другими нормативными документами, и реальную (рабочую), которую преобразователь имеет в действительности.

Динамическая характеристика преобразователя представляет собой зависимость изменения выходного сигнала преобразователя от времени при изменении входного сигнала. Динамические свойства преобразователей характеризуются такими понятиями, как скорость и время преобразования. *Скорость преобразования* (измерения) определяется числом преобразований (измерений) в единицу времени, выполненных с нормированной погрешностью. *Время преобразования* (измерения) — время, прошедшее с начала преобразования (измерения) до получения результата с нормированной погрешностью.

Чувствительностью преобразователя называют отношение изменения выходной величины к вызывающему это изменению входной величины. Чувствительность равна производной от функции

преобразования преобразователя $S = dy/dx = \Delta y/\Delta x$ и геометрически выражается тангенсом угла наклона касательной в любой точке кривой функции преобразования. Для линейных преобразователей чувствительность постоянна — $S = \Delta y/\Delta x = \text{const}$, а для нелинейных всегда зависит от величины входного сигнала, т. е. выражается функциональной зависимостью $S = g(x)$.

Абсолютные, относительные и приведенные ***погрешности*** преобразователя определяются по входу и выходу, так как входная и выходная величины могут иметь различную физическую природу, а также вследствие того, что часто отсутствует измерительный преобразователь, по которому можно было бы проверить рабочий преобразователь. Смысл определения погрешности по входу и выходу поясняется на рис. 3.2, *а*.

Абсолютная погрешность преобразователя по выходу Δy — это разность значений реальной $y_р$ и номинальной $y_{ном}$ функций преобразования при одном и том же значении входной величины x:

$$\Delta y = y_р - y_{ном}.$$

Погрешность создается самим преобразователем, поэтому необходимо знать значение входного сигнала, соответствующего погрешности преобразователя.

Абсолютная погрешность преобразователя по входу определяется по формуле

$$\Delta x = x_{ном} - x_д,$$

где $x_д$ — действительное значение входной величины; $x_{ном}$ — значение входной величины, определяемое по номинальной функции

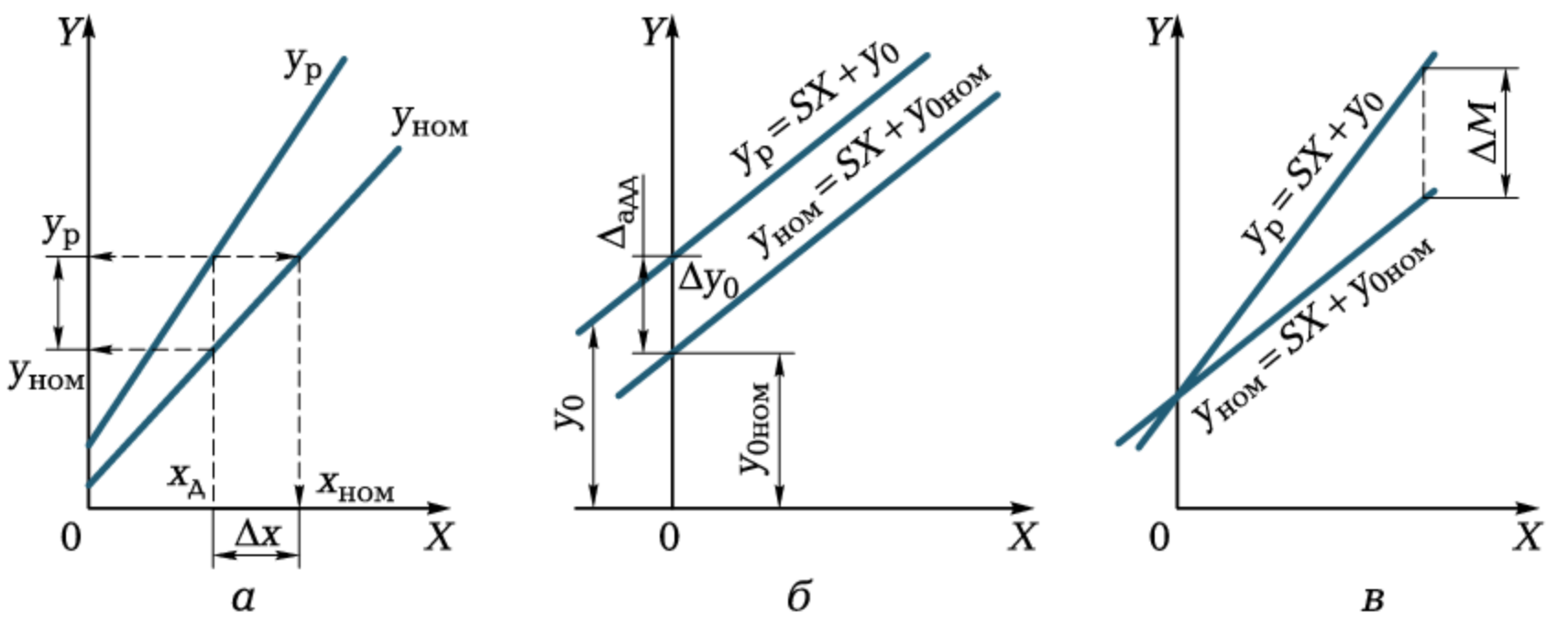


Рис. 3.2. Графики погрешностей:

а — по входу *X* и выходу *У*; *б* — аддитивная; *в* — мультипликативная

преобразования при значении выходной величины $y_{ном}$, соответствующей действительному значению $x_д$.

Относительные погрешности по выходу и входу определяются соответственно равенствами:

$$\sigma_{вых} = \frac{\Delta y}{y_р} \text{ и } \sigma_{вх} = \frac{\Delta x}{x_д}.$$

Приведенные погрешности по выходу и входу соответственно:

$$\sigma_{пр.вых} = \frac{\Delta y}{(y_{max} - y_{min})} \text{ и } \sigma_{пр.вх} = \frac{\Delta x}{(x_{max} - x_{min})},$$

где x_{max}, x_{min}, y_{max}, y_{min} — максимальные и минимальные значения входной и выходной величин преобразователя.

Погрешности преобразования зависят от свойств преобразователя и условий работы (температуры и влажности окружающей среды, наличия внешних электрических и магнитных полей и т. д.). При нормировании точности измерительных преобразователей обычно указывают допустимые значения погрешностей преобразования, реализуемые преобразователем при нормальных условиях работы (основная погрешность), и допустимые изменения функции преобразования при определенных изменениях влияющих величин.

На практике часто используются преобразователи с линейной функцией преобразования, не проходящей через начало координат (рис. 3.2, *б*):

$$y_р = SX + y_0,$$

где $y_р$ — значение выходной величины при нулевом значении входной; S — чувствительность.

Отклонение реальной функции от номинальной вызвано отклонениями y_0 и S. Погрешность, обусловленную неноминальным значением выходной величины при нулевом значении входной, называют *аддитивной*:

$$\Delta_{адд} = \Delta y_0 = y_0 - y_{0ном},$$

где $y_{0ном}$ — номинальное значение выходной величины при нулевом значении входной.

При изменении y_0 график функции преобразования (см. рис. 3.2, *б*) перемещается параллельно самому себе, т. е. аддитивная погрешность не зависит от входной величины.

Погрешность, обусловленную неноминальным значением чувствительности S, называют *мультипликативной*. Погрешность чувствительности, представляющая собой мультипликативную со-

ставляющую основной погрешности, приводит к изменению угла наклона реальной характеристики преобразователя относительно номинальной (рис. 3.2, *в*). При этом абсолютная погрешность $\Delta M = y_0 - y_{ном}$ зависит от входной величины x. Абсолютная мультипликативная погрешность пропорциональна входной величине x.

Классификация измерительных преобразователей. Преобразователи обычно классифицируют по принципу их работы или практическому применению.

По назначению измерительные преобразователи подразделяют на первичные (датчики), унифицированные и промежуточные.

Первичный преобразователь является первым в измерительной цепи и включает в себя чувствительный элемент (зонд, мембрану) и другие необходимые элементы для преобразования входной неэлектрической величины в выходную электрическую величину. Датчик может состоять из одного или нескольких измерительных преобразователей, объединенных в единую конструкцию. На датчик непосредственно воздействует измеряемая неэлектрическая величина (сила, давление, уровень, температура и т. д.).

Унифицированный преобразователь состоит из датчика и схемы согласования, при этом измеряемая физическая величина преобразуется с использованием источника энергии в нормированную выходную величину. Нормированные сигналы постоянного тока находятся в диапазоне 0...±5 или 0...±20 мА. Для устройств со смещенным нулем диапазон тока сужен до значений: ±1...±5 или ±4...±20 мА.

При необходимости регулирования границы диапазона токовых сигналов лежат в пределах: нижняя 0...5 мА, верхняя 12...25 мА. В устройствах с нормированными токовыми сигналами допускается применение различных измерительных приборов с внутренним сопротивлением не более 1 кОм. Нормированные значения диапазонов сигналов напряжения составляют 0...±1 и 0...±10 В при внутреннем сопротивлении измерительных приборов не более 1 кОм. При использовании в качестве выходной величины частоты рекомендуемый диапазон ее изменения составляет 5...25 Гц. В пневматических системах нормировано давление газа — оно должно находиться в диапазоне 0,02...0,1 МПа.

Промежуточный преобразователь получает сигнал измерительной информации от предшествующего преобразователя и передает его после преобразования последующему преобразователю.

По характеру преобразования входной величины измерительные преобразователи бывают линейные и нелинейные.

У *линейных преобразователей* функциональная зависимость между входной и выходной величинами линейная; у *нелинейных преобразователей* — нелинейная.

По принципу действия датчики подразделяют на генераторные и параметрические. Выходным сигналом *генераторных датчиков* являются ЭДС, напряжение, ток или электрический заряд, функционально связанные с измеряемой величиной, например ЭДС термопары. К генераторным относят: индукционные, пьезоэлектрические, термоэлектрические датчики, некоторые разновидности электрохимических датчиков и др.

В *параметрических датчиках* измеряемая величина вызывает пропорциональное изменение параметра электрической цепи (R, L, C), например сопротивления реостатного датчика. К параметрическим относят: резистивные, электромагнитные, емкостные и другие датчики.

Основными характеристиками датчиков являются: тип, диапазон измеряемой величины, диапазон рабочих температур и погрешность в этом диапазоне, обобщенное входное и выходное сопротивления, частотная характеристика.

3.3. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Работа параметрических преобразователей основана на изменении параметра электрической цепи при внешнем воздействии, вызванном внешней измеряемой величиной. В зависимости от изменения параметра электрической цепи преобразователи подразделяют на *индуктивные*, *емкостные* и *резисторные* (преобразователи сопротивления).

В технических средствах измерения из параметрических преобразователей наиболее распространены *преобразователи сопротивления*. Изменение сопротивления проводника может происходить при различных внешних воздействиях. В промышленном производстве широко применяют преобразователи, в которых сопротивление электрической цепи изменяется под действием излучения, температуры, перемещения, механических напряжений и др. Рассмотрим применение наиболее распространенных типов резисторных преобразователей: *тепловых*, *реостатных*, *тензорезисторных* и *фотоэлектрических*.

Тепловые преобразователи представляют собой проводник или полупроводник с током, с большим температурным коэффициентом, осуществляющий теплообмен с окружающей средой. Имеется

несколько способов теплообмена: конвекция, теплопроводность среды, теплопроводность самого проводника, излучение.

Интенсивность теплообмена проводника с окружающей средой зависит от следующих факторов:

- скорости газовой или жидкой среды;
- физических свойств среды (плотности, теплопроводности, вязкости);
- температуры среды;
- геометрических размеров проводника.

Зависимость температуры проводника, а следовательно, и его сопротивления от перечисленных факторов можно использовать для измерения различных неэлектрических величин, характеризующих газовую или жидкую среду — температуры, скорости, концентрации, плотности (вакуума).

Тепловым преобразователем может служить проводник с высоким и стабильным температурным коэффициентом электрического сопротивления. Этим требованиям удовлетворяют в основном проводники из химически чистых металлов (платины, меди, никеля и др.), так как большинство из них обладает положительным температурным коэффициентом от 0,35 до 0,68 % на 1 °С в интервале температур 0...100 °С.

Одни из самых распространенных тепловых преобразователей — *термометры сопротивления*, которые применяют для измерения температуры. В зависимости от используемого материала (в основном — медь и платина) чувствительного элемента их подразделяют на термометры сопротивления платиновые (ТСП) и термометры сопротивления медные (ТСМ) градуировок 50М, 100М, 50П, 100П. Числа 50 и 100 означают сопротивление чувствительного элемента при 0 °С, буквы М и П — материал термометра сопротивления — медь или платина соответственно.

При изменении температуры электрическое сопротивление термометров определяют градуировочными данными и приближенной формулой

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \qquad (3.1)$$

где R_t — сопротивление термометра, Ом; R_0 — сопротивление термометра при 0 °С; α — температурный коэффициент (для меди $\alpha = 4{,}3 \cdot 10^{-3}$ K^{-1}).

Конструктивно чувствительный элемент медного термометра представляет собой намотанную на пластмассовый каркас медную изолированную проволоку толщиной 0,05...0,1 мм. Каркас с проволокой покрывают лаком и помещают в тонкостенную стальную гильзу.

При изготовлении чувствительных элементов платиновых термометров сопротивления кроме каркасного типа используются и другие конструктивные решения. Например, платиновый тонкопленочный чувствительный элемент с напылением на керамическом каркасе с серебряными выводами, достоинства которого состоят в небольших габаритах, низкой инерционности и достаточно высокой стабильности.

В настоящее время все чаще применяют полупроводниковые терморезисторы (термисторы), изготовляемые из сплава оксидов различных металлов: меди, кобальта, магния, марганца и др. В процессе изготовления преобразователь подвергают обжигу при высокой температуре, в результате которого оксиды спекаются в плотную массу в виде шарика, столбика или шайбы. Затем на нее напыляются электроды и подпаиваются выводы из медной проволоки. Для защиты от внешних воздействий чувствительный элемент термистора покрывают защитной краской, помещают в герметичный металлический корпус или запаивают в стекло.

С увеличением температуры сопротивление термисторов уменьшается. Зависимость сопротивления от температуры выражается формулой

$$R_t = A\mathrm{e}^{B/T},$$

где A — постоянная, зависящая от материала термистора, его размеров и формы; B — постоянная, зависящая от физических свойств полупроводника; T — абсолютная температура преобразователя.

Достоинства термисторов состоят в очень высоком (отрицательном) температурном коэффициенте сопротивления (2,5 ... 4 % на 1 °С), высокой чувствительности, в шесть — десять раз превышающей чувствительность металлического терморезистора, малой теплоемкости и инерционности. Недостатки заключаются в нелинейной зависимости их сопротивления от температуры, большом разбросе и нестабильности характеристик от одного образца к другому.

Реостатный преобразователь (рис. 3.3, *а ... е*) представляет собой реостат, движок которого перемещается под действием измеряемой неэлектрической величины. Следовательно, входной величиной реостатных преобразователей является перемещение движка реостата, механически связанного с измеряемой неэлектрической величиной, а выходной величиной — активное сопротивление.

Конструктивно реостатные преобразователи выполняют как с проводом, намотанным на каркас, так и реохордного типа. В качестве материала провода применяют нихром, манганин, константан

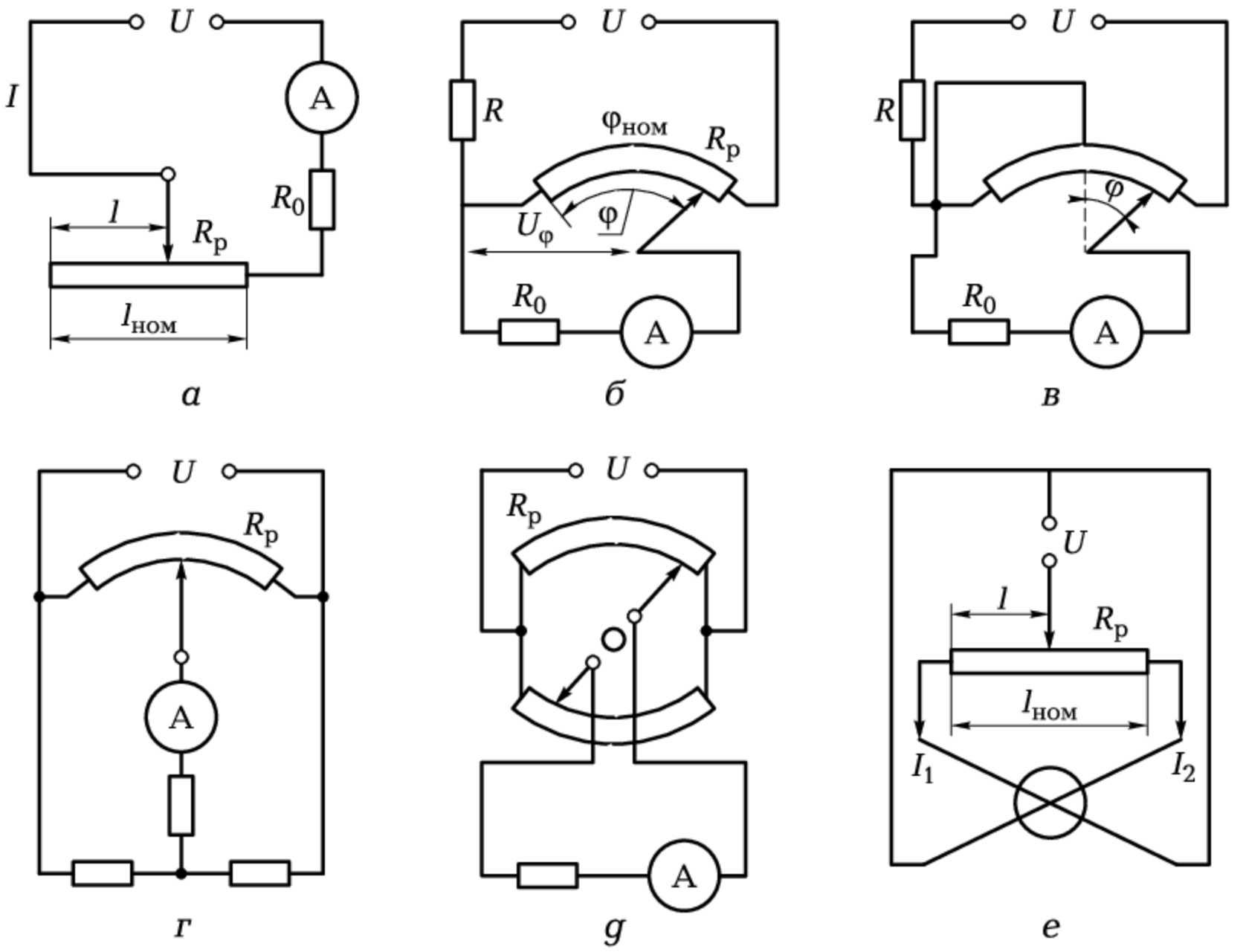


Рис. 3.3. Схемы подключения реостатных преобразователей:

а — с последовательным подключением; *б*...*g* — по схеме делителя напряжения; *е* — с использованием логометра

и др. В ответственных случаях, когда требования к износоустойчивости контактных поверхностей высоки или когда контактные давления очень малы, применяют сплавы платины с иридием, палладием. Провод реостата должен быть покрыт либо эмалью, либо слоем оксидов для изоляции соседних витков. Движки бывают проволочные (из двух-трех проволочек сплава платины и иридия) с контактным давлением 0,003...0,005 Н или пластинчатые (из серебра, фосфористой бронзы) с усилием 0,05...0,1 Н.

При использовании реостатных преобразователей для измерения неэлектрических величин часто возникает задача получить линейную зависимость угла отклонения указателя от измеряемой неэлектрической величины. В подобных случаях применяют *функциональные реостатные преобразователи* с нелинейным распределением сопротивления вдоль каркаса. Такого распределения сопротивления достигают, например, изменяя высоту каркаса, шунтируя части линейного реостата постоянными сопротивлениями, используя намотку с переменным шагом, намотку отдельных

участков каркаса проводами разного диаметра или с различными удельными сопротивлениями и т. д.

Рассмотрим варианты построения приборов с реостатными преобразователями для схемы, приведенной на рис. 3.3, *а*. Силу тока I можно выразить формулой

$$I = \frac{U}{R_0 + R_\text{р}\left(1 - \dfrac{l}{l_\text{ном}}\right)}, \tag{3.2}$$

где U — входное напряжение; l — отклонение движка, соответствующее текущему значению измеряемой величины; $l_\text{ном}$ — номинальное отклонение, при котором сопротивление линейного реостата $R_\text{р} = 0$; R_0 — сопротивление отсчетного устройства.

Если отклонение движка угловое, то вместо l и $l_\text{ном}$ следует принять φ и $\varphi_\text{ном}$.

Как видно из формулы (3.2), связь тока с отклонением движка реостата оказывается нелинейной, поэтому цепь, изображенную на рис. 3.3, *а*, применяют редко.

В цепи, показанной на рис. 3.3, *б*, реостатный преобразователь включен по схеме делителя напряжения. Величина напряжения U_φ, формируемая преобразователем, определяется по формуле

$$U_\varphi = \frac{U\left(\varphi / \varphi_\text{ном}\right)}{\dfrac{R}{R_0} + 1 - \dfrac{\varphi/\varphi_\text{ном}}{1 + R_0 \Big/ \left(R_\text{р}\varphi_\text{ном} / \varphi\right)}}. \tag{3.3}$$

Наличие в знаменателе члена $\varphi_\text{ном}/\varphi$ приводит к нелинейной зависимости входного напряжения U_φ от отклонения φ. Однако при очень большом сопротивлении отсчетного устройства R_0 (при использовании указателя, включенного через усилитель) этот член оказывается равным нулю, и связь между выходным напряжением U_φ и углом φ становится линейной и определяется по формуле

$$U_\varphi = \frac{U\varphi/\varphi_\text{ном}}{\dfrac{R}{R_\text{р}} + 1}. \tag{3.4}$$

Электрические цепи, представленные на рис. 3.3, *в*, *г*, характеризуются нелинейностью, но позволяют при применении указателя с двухсторонней шкалой определять отклонение измеряемой величины в обе стороны от нуля. Нелинейность при включении преобразователя по схеме на рис. 3.3, *д* незначительна.

Показания прибора, изображенного на рис. 3.3, *е*, где в качестве указателя использован логометр, не зависят в известной степени от постоянства напряжения источника питания, так как отклонение логометра является функцией отношения токов, а следовательно, перемещения движка *l*, т. е. угол отклонения стрелки логометра γ будет являться функцией

$$\gamma = f_1\left(I_1/I_2\right) = I_2\left(R_1/R_2\right) = f\left(l\right),$$

т. е. зависимость токов I_1 и I_2 от перемещения *l* в этой цепи нелинейна. Но изменяя форму полюсных наконечников или сердечника измерительного механизма логометра, можно получить нужный вид зависимости $\gamma = f_1(I_1/I_2)$, а следовательно, и требуемый характер шкалы $\gamma = f(l)$ измерительного устройства.

Наиболее широкое распространение реостатные преобразователи получили в устройствах измерения уровня, ускорения, перемещения и других устройствах, в которых величина перемещения лежит в пределах 0,005...0,5 м.

В основе работы ***тензорезисторных преобразователей*** лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводников при деформации сжатия-растяжения. При деформации проводника изменяются его длина *l* и площадь поперечного сечения *S*; при деформации кристаллической решетки — удельное сопротивление ρ. Эти изменения приводят к изменению сопротивления проводника:

$$R = \frac{\rho l}{S}. \qquad (3.5)$$

Важная характеристика тензоэффекта материала — коэффициент относительной чувствительности $S_{\text{отн}}$, определяемый как отношение изменения сопротивления к изменению длины проводника:

$$S_{\text{отн}} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l},$$

где $\varepsilon_R = \Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления проволоки; $\varepsilon_l = \Delta l/l$ — относительное изменение длины проводника.

К материалу тензопреобразователей предъявляют следующие требования:

- возможно большее значение коэффициента относительной чувствительности $S_{\text{отн}}$;

- небольшие значения температурного коэффициента сопротивления, так как нагрев преобразователя может вызвать изменение его сопротивления, соизмеримое с рабочим изменением и соответственно привести к температурной погрешности;
- высокое удельное сопротивление, что необходимо для уменьшения габаритных размеров преобразователя.

Для изготовления тензорезисторов используют в основном константан, нихром, манганин, никель, хромель, висмут, титано-алюминиевый сплав и полупроводниковые материалы (соединения германия, кремния и т. д.).

В настоящее время наиболее широко применяют проволочные, фольговые, пленочные и полупроводниковые тензорезисторы.

Фотоэлектрическими преобразователями (фотоэлементами) называют такие, у которых выходной сигнал изменяется в зависимости от падающего светового потока. Явление фотоэффекта было открыто русским ученым А. Г. Столетовым (1888). Различают три типа фотоэлектрических преобразователей: фотоэлементы с внешним фотоэффектом, фотоэлементы с внутренним фотоэффектом и фотогальванические преобразователи. В настоящее время наибольшее распространение получили полупроводниковые *фотоэлектрические* преобразователи с *внутренним фотоэффектом* (фоторезисторы) и *фотогальванические* (фотодиоды и фототранзисторы). Внутренний фотоэффект заключается в появлении свободных электронов, выбитых квантами света из электронных орбит атомов, остающихся свободными внутри вещества. Появление свободных электронов в материале эквивалентно уменьшению электрического сопротивления. Фоторезисторы имеют высокую чувствительность и линейную вольт-амперную характеристику (ВАХ), т. е. их сопротивление не зависит от приложенного напряжения. На темновое сопротивление, чувствительность и инерционность влияет температура. Для уменьшения температурной погрешности рекомендуется включать фоторезисторы в смежные плечи моста.

Внутренний фотоэффект наиболее сильно выражен у таких полупроводников, как селен (Se), сульфид свинца (PbS), сульфид кадмия (CdS), селенид кадмия (CdSe) и др. В зависимости от силы света электрическое сопротивление освещенного фоторезистора изменяется в пределах от 100 Ом до 1 кОм.

Спектральная чувствительность определяется выбором материала. Так, CdS обладает максимальной чувствительностью в зеленой области спектра, поэтому особенно пригоден для измерителей освещенности. В противоположность этому максимум спектральной

чувствительности CdSe находится в красной области, а у фоторезисторов из PbS/PbSe — в инфракрасной области спектра.

Фоторезисторы выпускают в различных конструктивных решениях, обеспечивающих разнообразие возможностей применения. Достоинства фоторезисторов заключаются в высокой удельной чувствительности (до 7 000 мкА/(лм·В)), что в некоторых случаях позволяет обойтись без усилителей; низком температурном коэффициенте; сравнительно большой мощности рассеивания (0,6 ... 0,7 Вт); практически неограниченном сроке службы и достаточной стабильности. К недостаткам этих фотоэлементов можно отнести значительную инерционность и сравнительно высокий уровень шумов.

Фотоэлектрические преобразователи в настоящее время широко применяют для измерения различных неэлектрических величин — перемещения тел, качества поверхности, скорости вращения, концентрации растворов и т. д.

Оптическая схема обычных фотоэлектрических датчиков имеет три основные разновидности: 1) работа на просвет; 2) на обратное отражение; 3) рассеянное отражение.

В датчиках, работающих *на просвет*, приемник и излучатель расположены напротив друг друга таким образом, что световой поток из излучателя попадает непосредственно в приемник. Положение объекта определяется, когда он перекрывает луч от излучателя в приемник (создается световой барьер). Настройка взаимного расположения датчиков заключается в том, чтобы максимальное количество света от излучателя попадало в приемник. Это означает, что при расположении приемника и излучателя напротив друг друга свет от последнего попадает в центр поля зрения приемника.

Фотоэлектрические датчики, срабатывающие *на обратное отражение*, содержат в одном корпусе схемы излучателя и приемника. Световой луч распространяется от излучателя до обратного отражателя и затем попадает в приемник. Большинство обратных отражателей выполнено из множества малых призм, образованных углом куба. При падении светового луча на призму три поверхности отражают луч в обратном направлении параллельно падающему лучу, и отраженный луч поступает в приемник. Иными словами, обратный отражатель отражает луч в направлении его падения.

Пример. Рассмотрим принцип действия фотоэлектрических концевых выключателей для контроля момента достижения механизмом крайнего положения.

Достижение крайнего положения определяется по перекрытию светового потока, падающего с отражателя на фотоэлемент. На рис. 3.4 по-

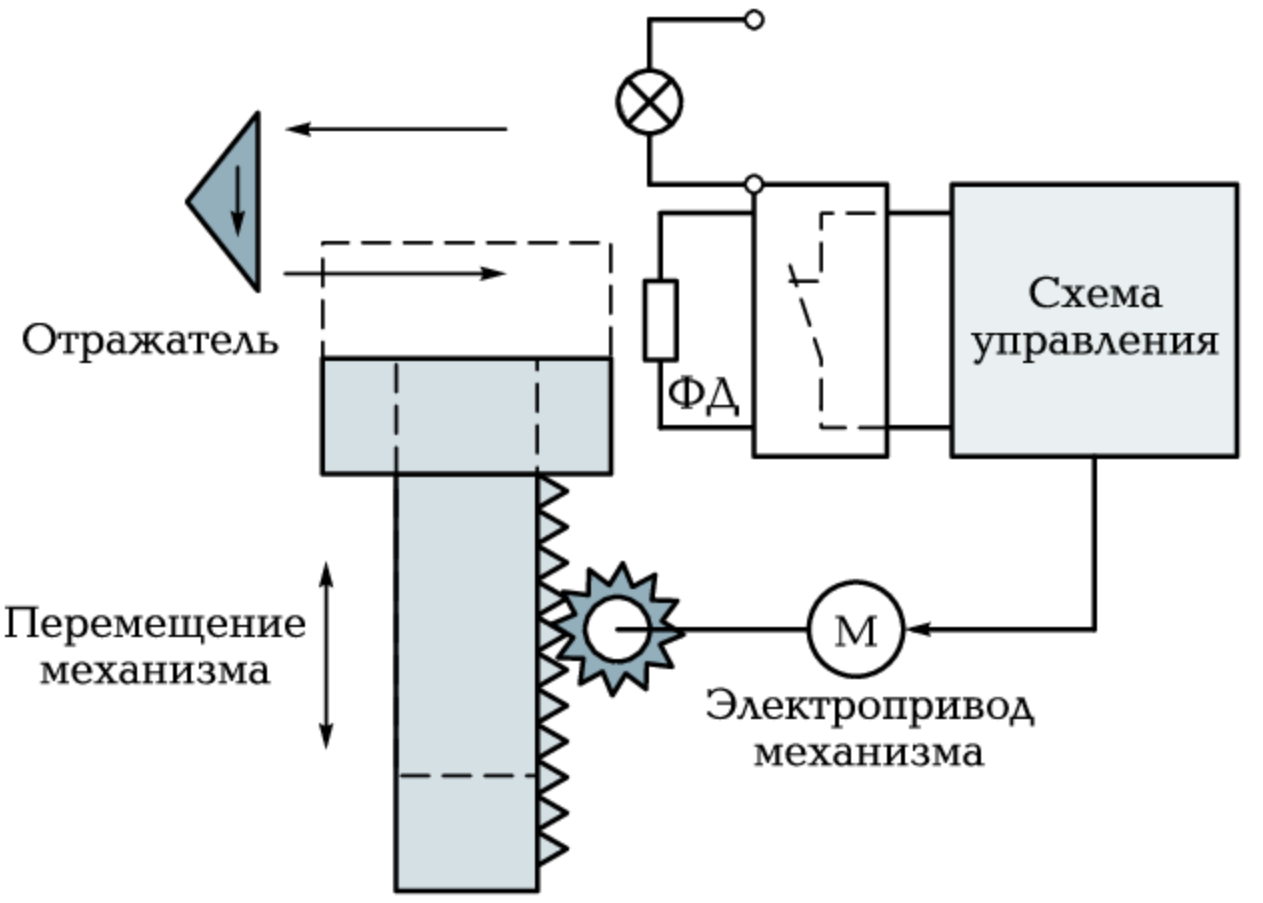


Рис. 3.4. Использование фотодатчика (ФД) в схеме остановки механизма в крайнем положении

казан принцип использования фотоэлемента для остановки механизма. На подобном принципе основаны системы контроля определенной зоны пространства на наличие объектов. Данная схема может работать как по принципу обратного распространения, так и на просвет.

Фотоэлектрические датчики (ФД), срабатывающие *на рассеянное отражение*, обнаруживают объект, расположенный перед датчиком по отраженному от объекта излучению самого датчика. Свет от излучателя падает на поверхность и отражается под разными углами так, что некоторая доля рассеянного от поверхности объекта излучения попадет в приемник датчика. Схема работы с рассеянным отражением не столь эффективна, поскольку только малая часть света от излучателя попадает в приемник. Диапазон срабатывания от яркого белого объекта будет значительно больше, чем от черного.

Емкостный преобразователь представляет собой конденсатор, емкость которого изменяется под действием измеряемой неэлектрической величины.

В качестве емкостного преобразователя широко используют плоский конденсатор, емкость которого можно выразить формулой

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{\delta}, \qquad (3.6)$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды между обклад-

ками конденсатора, Ф/м; S — площадь обкладки, м^2; δ — расстояние между обкладками, м.

Так как измеряемая неэлектрическая величина может быть функционально связана с любым из этих параметров, устройство емкостных преобразователей может быть самым различным в зависимости от области применения (рис. 3.5, *а*...*е*). Для измерения уровней жидких и сыпучих тел используют цилиндрические или плоские конденсаторы; малых перемещений, быстроизменяющихся сил и давлений — дифференциальные емкостные преобразователи с переменным зазором между обкладками.

На рис. 3.5, *а* показан емкостный *уровнемер*. Емкость C такого преобразователя является функцией уровня и может быть определена как емкость двух параллельно соединенных конденсаторов: один из них (C_1) образован частью электродов и диэлектриком — жидкостью с диэлектрической проницаемостью ε_1, уровень которой измеряется, а другой (C_2) — остальной частью электродов и диэлектриком — воздухом, с диэлектрической проницаемостью ε_2. Так как форма емкостного уровнемера обычно цилиндрическая с радиусами R_1 и R_2 для внешнего и внутреннего цилиндров соответственно, емкость определяется формулой

$$C = C_1 + C_2 = \left[L_2\varepsilon_2 + L_1\varepsilon_1\right]\frac{2\pi}{\ln\left(R_1/R_2\right)}.$$

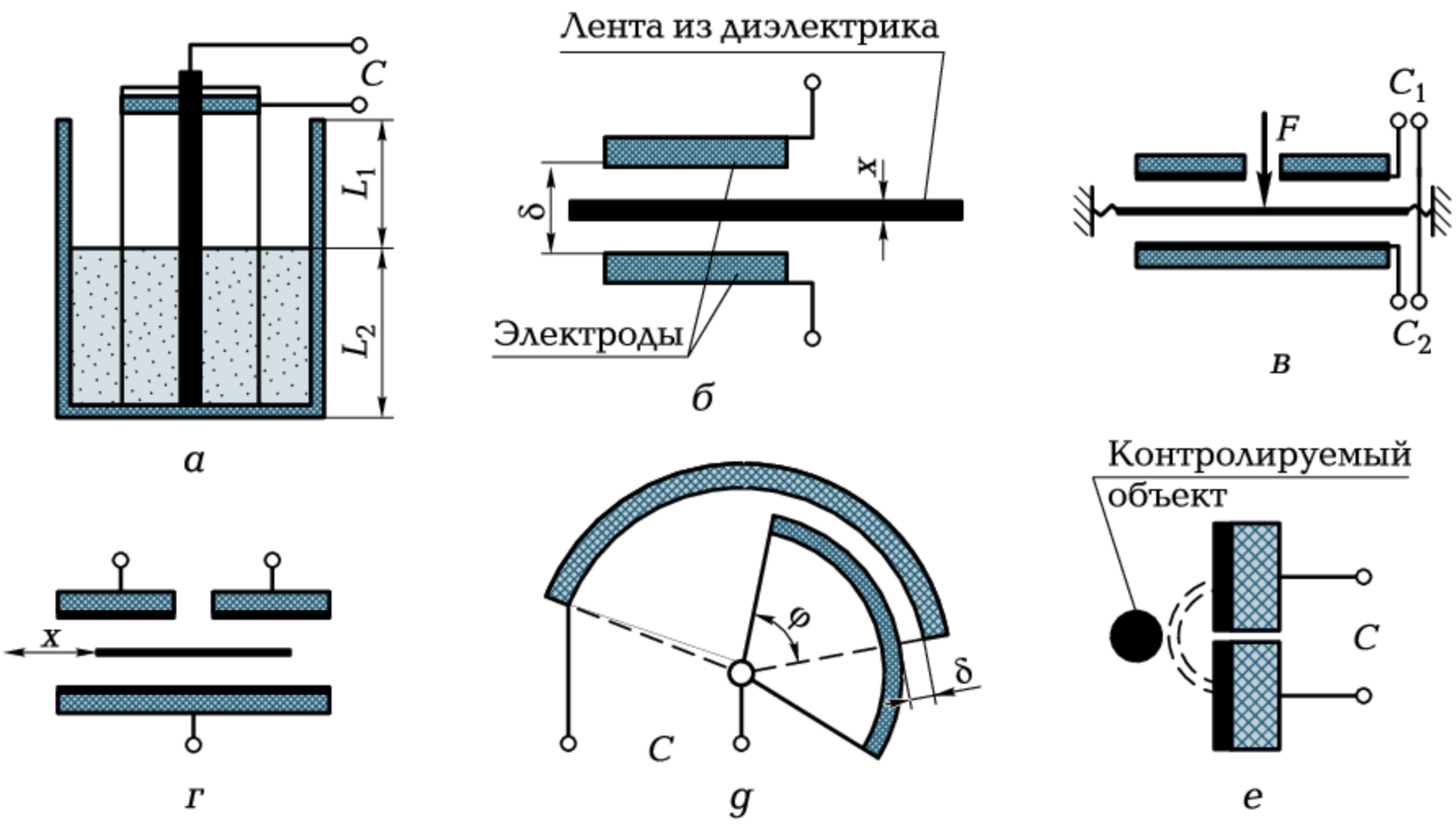


Рис. 3.5. Варианты (*а*...*е*) использования емкостных преобразователей

Емкостный *толщиномер* (рис. 3.5, *б*) служит для измерения толщины ленты из диэлектрика (резины, полиэтилена и т.д.). Ленту протягивают между обкладками, и в зависимости от ее толщины изменяют диэлектрическую проницаемость межэлектродного пространства.

Емкость можно выразить формулой

$$C = \frac{S}{\frac{\delta - x}{\varepsilon_0} + \frac{x}{\varepsilon_A}},$$

где δ — ширина зазора; x — толщина ленты; $\varepsilon_д$ — диэлектрическая проницаемость ленты.

На рис. 3.5, *в* показан емкостный дифференциальный *измеритель усилия*. Средняя обкладка закреплена на пружинах и перемещается параллельно неподвижным обкладкам под действием измеряемой силы F. При этом зазор между обкладками изменяется и соответственно емкость C_1 уменьшается, а емкость C_2 увеличивается.

Для измерения перемещений может быть использован емкостный *измеритель перемещений*, показанный на рис. 3.5, *г*. Подвижный электрод перемещается вдоль неподвижных с неизменным зазором. Емкость в этом случае пропорциональна площади перекрываемых обкладок.

На рис. 3.5, *д* изображено устройство емкостного преобразователя *для измерения угла поворота вала*. Подвижная обкладка измерителя жестко скреплена с валом и перемещается относительно неподвижной так, что зазор между обкладками остается неизменным, а изменяется перекрываемая площадь обкладок, а следовательно, и емкость преобразователя.

На рис. 3.5, *е* показан принцип действия емкостного датчика *наличия объекта*. При вхождении объекта в зону действия датчика изменяется диэлектрическая проницаемость среды между обкладками и соответственно емкость. Сигнал изменения емкости будет свидетельствовать о наличии объекта в зоне работы датчика.

Индуктивный преобразователь преобразует значение измеряемой (механической) величины в значение индуктивности электрической цепи. Он представляет собой катушку индуктивности, полное сопротивление которой изменяется при взаимном относительном перемещении элементов магнитопровода (рис. 3.6, *а*...*в*). На рис. 3.6, *а* изображен самый распространенный преобразователь *с воздушным зазором l*, величина которого изменяется под действием измеряемой величины P (сосредоточенная сила, давление, линейное перемещение), а вследствие этого — магнитное

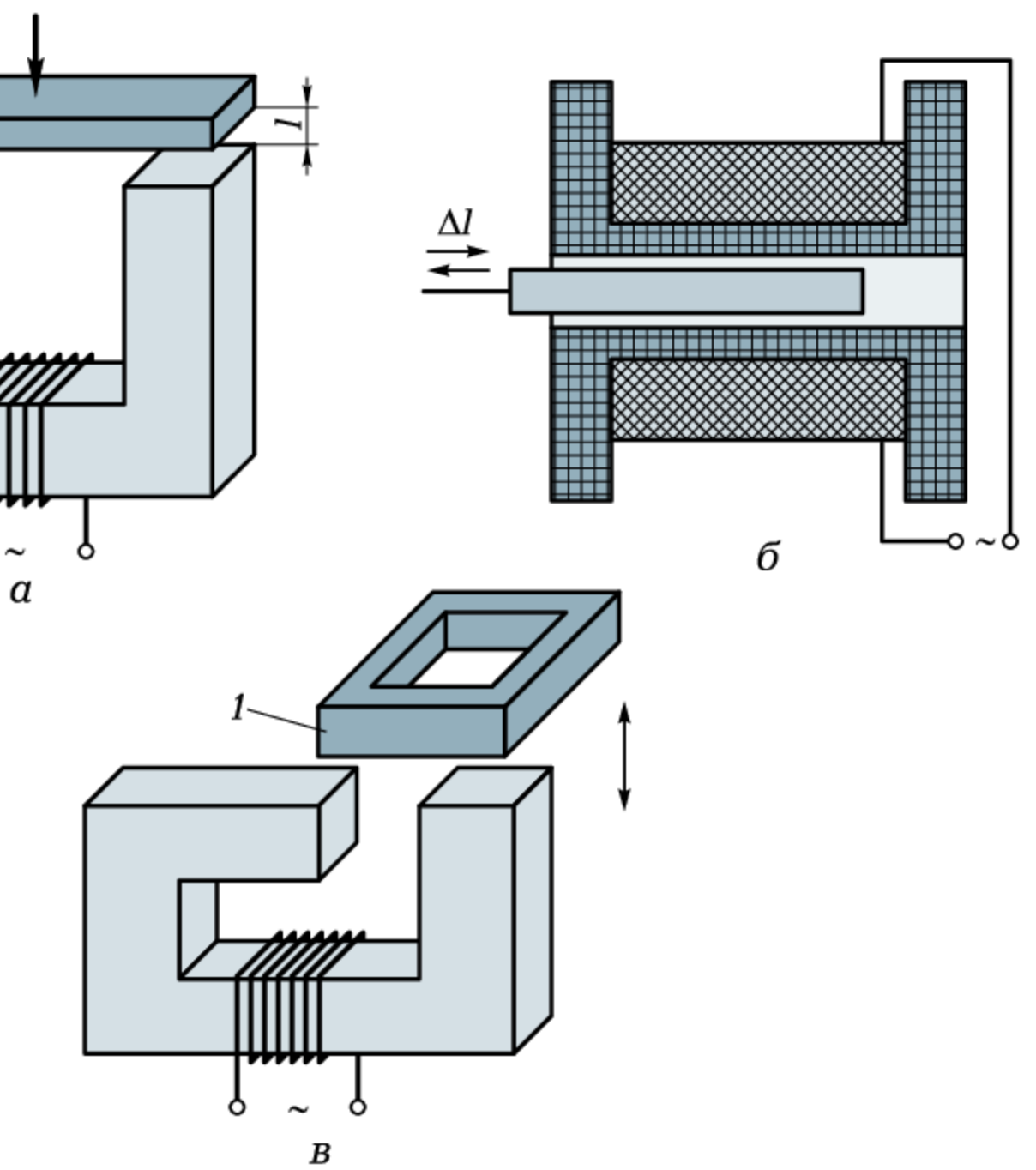


Рис. 3.6. Разновидности индуктивных преобразователей:
а — с изменяющимся воздушным зазором (*1* — обмотка; *2* — сердечник); *б* — с разомкнутой магнитной цепью; *в* — с перемещающимся короткозамкнутым витком (*1* — короткозамкнутый виток)

сопротивление магнитной цепи и индуктивность катушки, надетой на сердечник и включенной в цепь переменного тока.

Индуктивность L катушки определяется по формуле

$$L = \frac{\omega^2}{R_{\text{м}}} \text{ или } L = \frac{\omega^2}{R_{\text{м.ст}} + R_S} = \frac{\omega^2}{R_{\text{м.ст}} + \dfrac{2l}{\mu_0 S}},$$

где ω — число витков катушки; $R_{\text{м}}$ — полное сопротивление магнитной цепи, Гн$^{-1}$; $R_{\text{м.ст}}$ — магнитное сопротивление участков из стали; R_S — магнитное сопротивление воздушных зазоров, Гн$^{-1}$; l — ширина воздушного зазора, м; $\mu_0 = 1{,}26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная проницаемость воздушного зазора; S — площадь воздушного зазора, м^2.

Таким образом, у данного преобразователя естественной входной величиной является перемещение сердечника, а выходной —

изменение индуктивности обмотки, что приводит к изменению ее полного сопротивления Z. В связи с этим возникает функциональная зависимость между измеряемой механической величиной P и электрическим сопротивлением Z преобразователя.

Преобразователь с *разомкнутой магнитной цепью* (рис. 3.6, *б*) состоит из катушки, внутри которой помещен стальной сердечник. Вследствие перемещения сердечника изменяется индуктивность катушки, которая является функцией измеряемой механической величины.

В преобразователе, представленном на рис. 3.6, *в*, при введении в воздушный зазор *короткозамкнутого витка* индуцированные в витке токи создают активные потери, что эквивалентно введению в магнитную цепь реактивного магнитного сопротивления, которое наряду с уменьшением площади рабочего воздушного зазора увеличивает общее магнитное сопротивление, пропорциональное перемещению витка.

Основными недостатками индуктивных преобразователей являются нелинейность функции преобразования, наличие значительной аддитивной погрешности (например, температурной погрешности, связанной с изменением активного сопротивления обмотки) и значительная сила притяжения якоря.

Этих недостатков лишены ***дифференциальные преобразователи***, которые состоят из двух одинаковых одинарных преобразователей, имеющих общий подвижный элемент (рис. 3.7, *а*, *б*).

При перемещении якоря индуктивность плеча Z_1 возрастает, а плеча Z_2 уменьшается. Благодаря использованию дифференци-

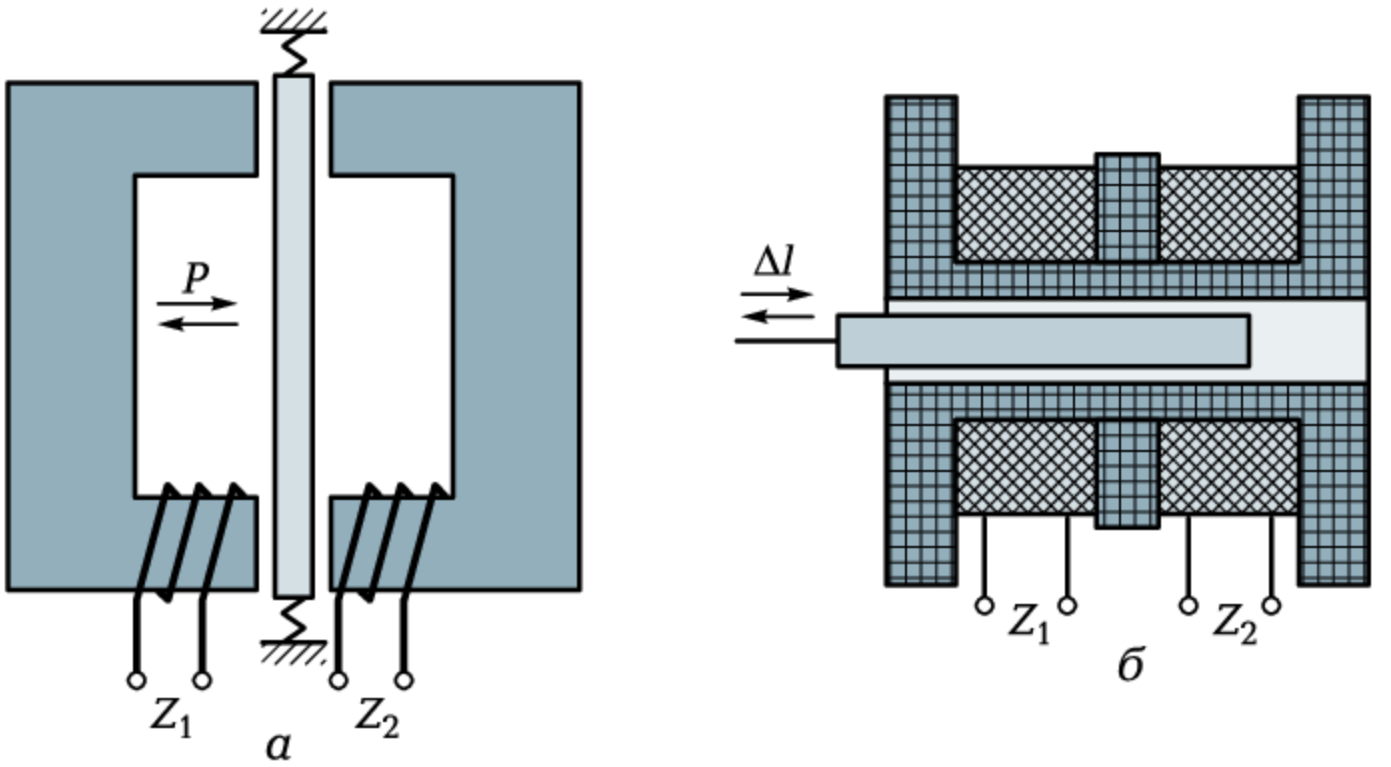


Рис. 3.7. Разновидности дифференциальных преобразователей:
а — с подвижным сердечником; *б* — с разомкнутой магнитной цепью

альных цепей уменьшается аддитивная погрешность, улучшается линейность функции, примерно вдвое возрастает чувствительность и уменьшается сила притяжения якоря, что обусловливает широкое применение дифференциальных преобразователей.

Также широко распространены ***взаимоиндуктивные***, или ***трансформаторные***, преобразователи — одна из разновидностей индуктивных преобразователей. В них происходит преобразование значения измеряемой величины в значение взаимной индуктивности. При наличии двух обмоток на магнитной цепи при изменении магнитного сопротивления $R_м$ будет изменяться взаимная индуктивность M между обмотками катушек (ω_1, ω_2 — число витков первичной и вторичной обмоток соответственно):

$$M = \frac{\omega_1 \omega_2}{l_м}.$$

Различают два вида трансформаторных преобразователей: с *изменяющимся магнитным сопротивлением* (рис. 3.8, *а*) и *постоянным магнитным сопротивлением и подвижной катушкой* (рис. 3.8, *б*). Также трансформаторные преобразователи с подвижным сердечником выполняют в виде *дифференциальных трансформаторных преобразователей* (рис. 3.8, *в*).

Принцип действия ***магнитоупругих преобразователей*** основан на изменении магнитной проницаемости μ ферромагнитных тел в зависимости от возникающих в них механических напряжений σ, связанных с воздействием на ферромагнитные тела механических сил P (растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих).

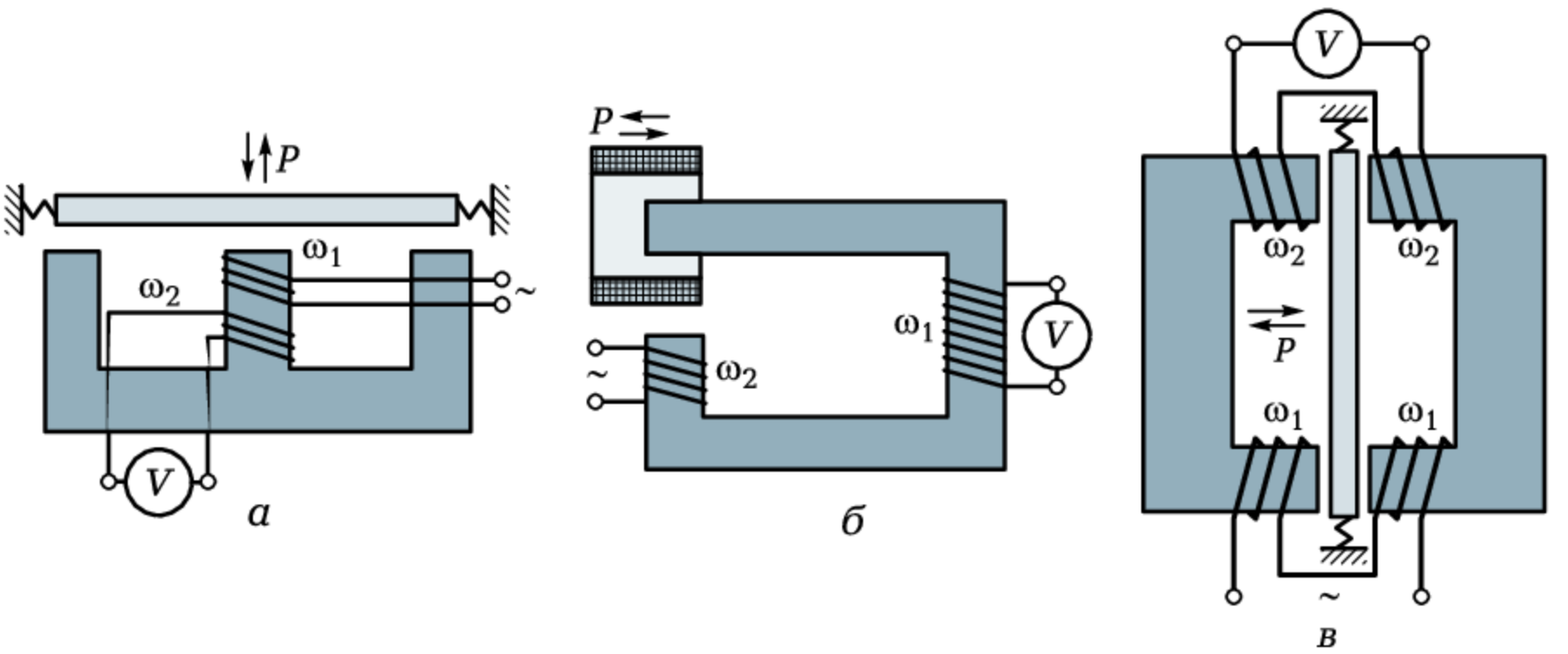


Рис. 3.8. Трансформаторные преобразователи:

а — с подвижным сердечником; *б* — с подвижной катушкой; *в* — дифференциальный с подвижным сердечником

Изменение магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника вызывает изменение магнитного сопротивления сердечника $R_м$, что приводит к изменению индуктивности катушки L, находящейся на сердечнике. Таким образом, в магнитоупругом преобразователе имеет место следующая цепь преобразований:

$$P \to \sigma \to \mu \to R_м \to L.$$

В двухобмоточных магнитоупругих преобразователях (трансформаторного типа), где под действием силы вследствие изменения магнитной проницаемости изменяется взаимная индуктивность M между обмотками и наводимая ЭДС вторичной обмотки E, цепь преобразования имеет вид:

$$P \to \sigma \to \mu \to R_м \to M \to E.$$

Эффект изменения магнитных свойств ферромагнитных материалов под влиянием механических деформаций называют *магнитоупругим эффектом*. Существует и обратное явление: ферромагнитное тело, внесенное в магнитное поле, изменяет свои размеры.

Явления, возникающие вследствие взаимной зависимости между механическими и магнитными состояниями ферромагнитных тел, называют *магнитострикционными*.

Магнитоупругие преобразователи могут работать как переменные индуктивные сопротивления, величина которых определяется приложенным к сердечнику механическим усилием, и как трансформаторные преобразователи с переменной взаимной индуктивностью между обмотками.

Магнитную цепь магнитоупругих преобразователей выполняют обычно из сплошного материала. Сердечник имеет щели для размещения обмотки.

У магнитоупругих преобразователей трансформаторного типа на переменном токе ЭДС во вторичной обмотке является функцией изменения взаимной индуктивности между катушками, обусловленной изменением магнитной проницаемости сердечника. Если первичную обмотку магнитоупругого преобразователя трансформаторного типа питать постоянным током, то он превращается в магнитоупругий преобразователь индукционного типа. В этом случае при измерении быстропеременных процессов во вторичной обмотке будет индуцироваться ЭДС, мгновенное значение которой определяется по формуле

$$e = -\omega_2 \frac{d\Phi}{d\tau} = -c\omega_2 \frac{d\sigma}{d\tau},$$

где Ф — магнитный поток; *c* — коэффициент, зависящий от свойств материала и напряженности намагничивающего поля.

Магнитоупругие преобразователи применяют для измерения значительных давлений (более 10 Н/мм^2, или 100 кг/см^2 (10 МПа)), так как они непосредственно воспринимают давление и не нуждаются в дополнительных преобразователях, и для измерения силы (в этом случае предел измерения прибора определяется площадью магнитоупругого преобразователя).

3.4. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В генераторных преобразователях происходит непосредственное преобразование измеряемой величины в энергию. Среди них наиболее распространены пьезоэлектрические, индукционные и термоэлектрические.

Пьезоэлектрические преобразователи изготовляют из материалов, в которых возможен пьезоэлектрический эффект (пьезоэффект) — прямой и обратный, и применяют для измерения переменных сил, давлений, вибрационных ускорений.

Прямой пьезоэффект заключается в возникновении электрических зарядов на гранях пьезоэлектрика при воздействии на него механической силы, вызывающей напряжение в материале. При устранении силы заряды исчезают.

Обратный пьезоэффект проявляется в том, что пьезоэлектрик, помещенный в электрическое поле, изменяет свои геометрические размеры.

Обычно в качестве пьезоэлектрика применяют сегнетову соль, титанат бария, кварц, в кристаллах которого кварца принято различать главные оси: электрическую *X*, механическую *Y* и оптическую *Z*.

Параллелепипед, вырезанный из кристалла кварца таким образом, чтобы его грани были параллельны главным осям, обладает следующими свойствами:

- продольным пьезоэффектом при воздействии силы F_X, направленной вдоль электрической оси *X*, на гранях, перпендикулярных этой оси, появляются электрические заряды;
- поперечным пьезоэффектом при воздействии силы F_Y, направленной вдоль механической оси *Y*, заряды появляются также на этих гранях;
- отсутствием зарядов при приложении механической силы вдоль оптической оси *Z*.

Заряды, возникающие на гранях кристалла под действием силы F_X, не зависят от геометрических размеров кристалла:

$$q = d_1 F_X, \tag{3.7}$$

где d_1 — постоянный коэффициент, называемый *пьезоэлектрической постоянной*.

Заряды, возникающие под действием силы F_Y, зависят от геометрических размеров кристалла и имеют противоположный знак:

$$q = -\frac{d_1 F_Y b}{a}, \tag{3.8}$$

где b и a — длина и ширина граней соответственно.

Из формулы (3.8) видно, что в случае необходимости можно повысить чувствительность пьезоэлектрика, увеличив отношение b/a.

В случае растягивающих усилий вдоль осей X и Y возникающие заряды будут иметь знаки, противоположные случаю сжимающих усилий.

В последнее время в качестве пьезоэлектриков применяют новые пьезокерамические материалы, например на основе свинца и бария, которые могут работать при температурах до 200 °С.

Заряд, возникающий на гранях пьезоэлемента под действием силы F, сохраняется лишь в отсутствие утечки, т. е. при бесконечно большом входном сопротивлении измерительной цепи. Практически это условие невыполнимо, поэтому пьезоэлектрические преобразователи для измерения статических сил не применяются. При действии динамических, т. е. переменных во времени, сил количество электричества на гранях все время восполняется и становится возможным потребление тока измерительной цепью.

Индукционными преобразователями называют такие преобразователи, в которых скорость изменения измеряемой величины преобразуется в индуцируемую ЭДС. Они являются разновидностью электромагнитных преобразователей. В данных преобразователях естественной входной величиной является скорость механического перемещения (и поэтому непосредственно они могут применяться только для измерения скорости линейных и угловых перемещений), а выходной — индуцированная ЭДС.

По принципу действия индукционные преобразователи можно разделить на две группы. В преобразователях первой группы индуцированная ЭДС наводится в катушке благодаря линейным или угловым колебаниям катушки в зазоре магнита.

При своем перемещении витки катушки пересекают под прямым

линейное перемещение Δl является некоторой функцией времени $\Delta l = f(\tau)$, то мгновенное значение ЭДС:

$$e = \omega B l_{\text{а}} \frac{df(\tau)}{d\tau},$$

где ω — число витков; B — индукция в зазоре; $l_{\text{а}}$ — активная длина витка.

В преобразователях второй группы индуцированная ЭДС наводится путем изменения магнитного потока вследствие колебаний полного магнитного сопротивления магнитной цепи, создаваемых чаще всего изменением воздушного зазора в этой цепи. Примеры преобразователей показаны на рис. 3.9, *а*...*г*.

На рис. 3.9, *а*, *б* изображены схемы датчиков с индукционным преобразователем для измерения скорости перемещения и скорости вращения катушки относительно постоянного магнита.

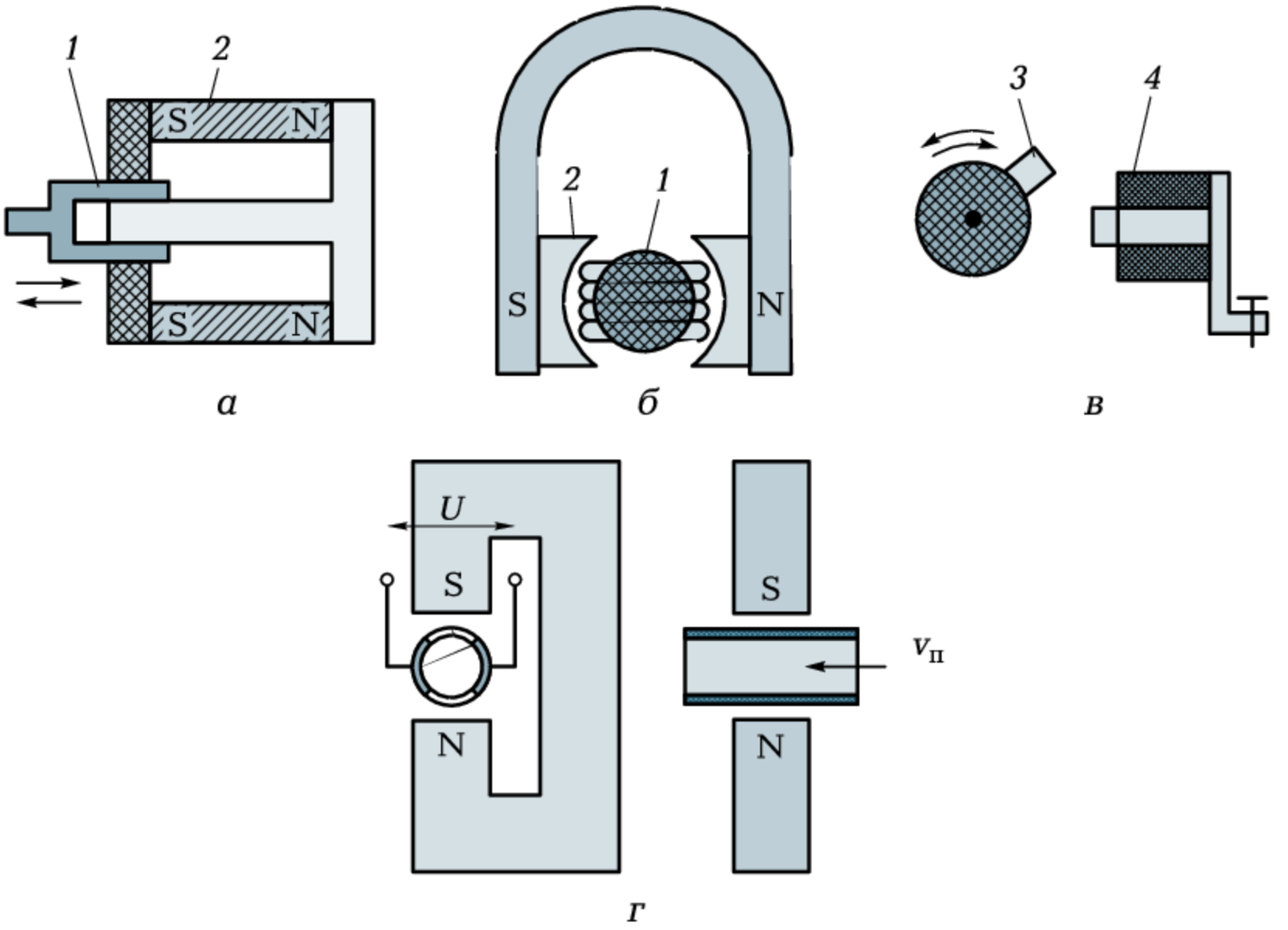


Рис. 3.9. Индукционные преобразователи:

а — с линейным и *б* — угловым перемещением катушки; *в* — с изменяющимся воздушным зазором; *г* — индукционный расходомер; *1* — катушка; *2* — постоянный магнит; *3* — стальной «зуб»; *4* — магнитная система; $v_{\text{п}}$ — скорость потока

Величина индуцированной ЭДС будет пропорциональна скорости перемещения или вращения катушки соответственно.

На рис. 3.9, *в* представлена схема устройства датчика скорости вращения. На валу укреплен стальной «зуб» *3*, который при вращении вала проходит мимо зазора неподвижно установленной магнитной системы *4* с постоянным магнитом, уменьшая магнитное сопротивление зазора этой системы. В катушке магнитной системы наводятся импульсы ЭДС. Каждый импульс соответствует одному обороту вала, следовательно, частота следования импульсов соответствует количеству оборотов вала в секунду.

Принцип измерения скорости вращения и перемещения положен в основу работы тахогенераторов, акселерометров, датчиков вибрации, ротационных и индукционных расходомеров и т. д.

В индукционном расходомере (см. рис. 3.9, *г*) используется эффект возникновения электрического тока в проводнике, перемещающемся в магнитном поле. Протекающая жидкость отождествляется с проводником, т. е. она должна обладать определенной минимальной проводимостью. Согласно закону Фарадея, в обладающей электрической проводимостью жидкости, протекающей через магнитное поле, возникает электрическое поле.

Контролируемый поток протекает по армированной изолятором трубе, в стенах которой перпендикулярно направлению магнитного поля и потока среды установлены два диаметрально расположенных электрода, с которых снимается напряжение, пропорциональное средней скорости потока среды. Этот образованный высокоомным источником сигнал напряжением несколько милливольт с помощью кабеля подается на измерительный преобразователь, усиливающий и осуществляющий его дальнейшую обработку.

Термоэлектрические преобразователи относятся к типу тепловых преобразователей и основаны на явлении термоэлектричества, принцип работы которого заключается в следующем. Если составить цепь из двух различных проводников (полупроводников) A и B и соединить их между собой (рис. 3.10, *а*), причем температуру t_1 одного места соединения сделать отличной от температуры t_0 другого, то в цепи появится ЭДС, называемая термоэлектродвижущей силой (термоЭДС), как следствие разности функций температур мест соединения проводников

$$E_{AB}(t_1, t_0) = f(t_1 - t_0).$$

Данную цепь называют термоэлектрическим преобразователем, или *термопарой* (ТП); проводники, составляющие термопару — *термоэлектродами*, а места их соединения — *спаями*.

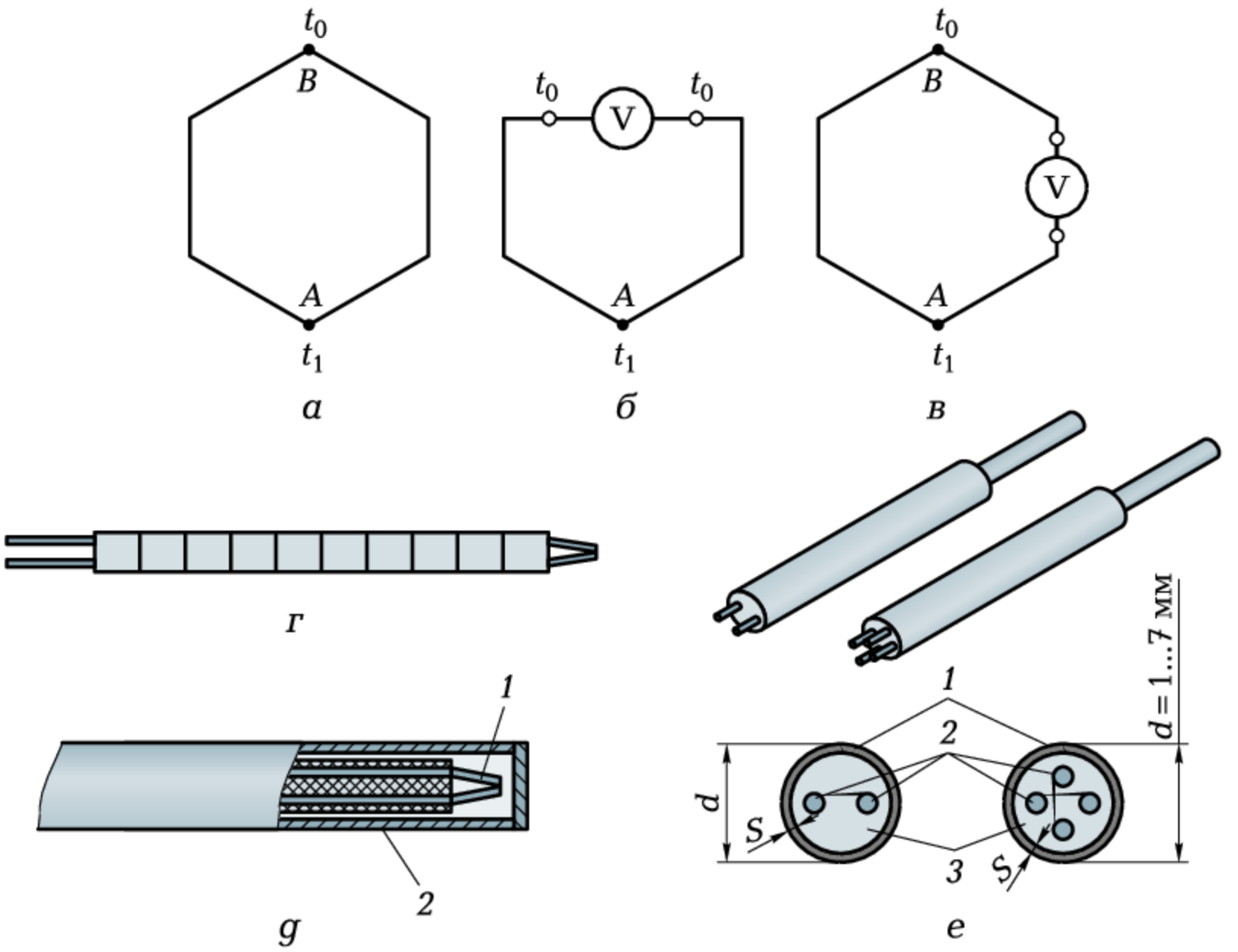


Рис. 3.10. Схемы включения (*а*...*в*) и варианты конструктивного исполнения (*г*...*е*) термоэлектрических преобразователей:
г — бескорпусная с открытым концом; *g* — в защитном чехле (*1* — корундовая соломка; *2* — наружный защитный чехол); *е* — кабельная (*1* — оболочка кабеля; *2* — термоэлектроды; *3* — минеральная изоляция (MgO))

Термопару можно использовать для измерения температуры. Если один спай термопары (рабочий спай) поместить в среду с температурой t_1, которую необходимо измерить, а температуру другого (нерабочего) спая поддерживать постоянной $f(t_0) = \text{const}$, то термоЭДС будет зависеть только от температуры t_1:

$$E_{AB}(t_1, t_0) = f(t_1 - t_0) = f(t_1) \text{ при } t_0 = \text{const}.$$

Последнее выражение положено в основу измерения температур методом термопар.

Таким образом, входной величиной термопары является температура t_1, рабочего спая, а выходной величиной — термоЭДС, которую термопара развивает при постоянной температуре t_0 нерабочего спая.

Включить измеритель (указатель) в цепь термопары можно по двум схемам (рис. 3.10, *б* и *в*). Обычно для измерения температуры в одной точке применяют первую схему, а для измерения разности

температур — вторую. Для того чтобы включение в цепь термопары указателя не изменило значения термоЭДС, места соединения указателя с термоэлектродами должны иметь одинаковую температуру.

Широкому применению в промышленности термопары обязаны в первую очередь своей простоте, удобству монтажа, возможности измерения локальной температуры. К числу достоинств термопар относят также широкий диапазон измеряемых температур, малую инерционность, возможность измерения малых разностей температур. Термопары могут обеспечивать высокую точность измерения температуры — до ±0,01 °С.

В зависимости от диапазона и условий измерений применяют различные типы термопар. Согласно ГОСТ 6616—94 в странах СНГ стандартизованы типы термопар, наиболее распространенные из которых представлены в табл. 3.2.

Верхний предел рабочего диапазона температур считается максимальной температурой длительного применения (более 1 000 ч) термопреобразователя. За этот срок изменение статической характеристики термопары по отношению к номинальной не должно превышать 1 %. Кратковременным применением считается работа термопреобразователя длительностью до 100 ч. За это время статическая характеристика термопары также не должна измениться больше чем на 1 %.

В табл. 3.3 приведены рекомендуемые рабочие атмосферы для применения приведенных в табл. 3.2 типов термопар, а также их дифференциальная чувствительность в указанных диапазонах температур. Из представленных данных видно, что универсальными термопарами являются две: медь-константановая (Т) и железо-константановая (J). Первая не нашла широкого применения в промышленности из-за узкого диапазона температур в области выше 0 °С и используется в основном для измерения низких температур. Термопара типа J широко используется в западных странах, но в России не получила распространения, по-видимому, из-за отсутствия производства высокочистого термоэлектродного железа. Кроме того, к недостаткам термопары можно отнести низкую коррозионную стойкость железного электрода и высокую чувствительность к деформации.

Термопреобразователи вольфрамрений-вольфрамрениевые (ТВР) имеют самый высокий предел длительного применения — 2 200 °С, но только в неокислительных средах, так как на воздухе уже при температуре 600 °С происходит быстрое окисление и разрушение термоэлектродов. Термопара устойчива в средах аргона, гелия,

Таблица 3.2. Типы и обозначения термопар

Тип термопары	Обозначение МЭК	Буквенные обозначения НСХ	Химический состав термоэлектродов, масс. %		Пределы измеряемых температур, °С		
			положительный	отрицательный	нижний	верхний	кратковременно
Медь-константановая (ТМКн)	Cu-CuNi	T	Cu(Кор)	Cu + (40...45)Ni + + Mn + 0,7Fe	–200	350	400
Хромель-копелевая (ТХК)	—	L	Ni + 9,5Cr	Cu + (42...44)Ni + + 0,5Mn + 0,1Fe	–200	600	800
Хромель-константановая (ТХКн)	NiCr-CuNi	E	Ni + 9,5Cr(Ф)	Cu + (40...45)Ni + + Mn + 0,7Fe	–200	700	900
Железо-константановая (ТЖК)	Fe-CuNi	J	Fe(Ч)	Cu + (40...45)Ni + + Mn + 0,7Fe	–200	750	900
Хромель-алюмелевая (ТХА)	NiCr-NiAl	K	Ni + 9,5Cr(З)	Ni + Si + 2Al + 2,5Mn	–200	1 200	1 300
Нихросил-нисиловая (ТНН)	NiCrSi-NiSi	N	Ni + 14,2Cr + 1,4Si(Г)	Ni + 4,4Si + 0,1Mg	–270	1 200	1 300

Платинородий-платиновые (ТПП13)	—	R	Pt + 13Rh(O)	Pt	0	1 300	1 600
Платинородий-платиновые (ТПП10)	—	S	Pt + 10Rh(O)	Pt	0	1 300	1 600
Платинородий-платинородиевая	—	B	Pt + 30Rh	Pt + 6Rh	600	1 700	—
Вольфрамрений-вольфрамрениевые	А-1; А-2; А-3	—	W + 5 %Re	W + 20 %Re	0	2 200	2 500

Примечания: 1. Указанные буквенные обозначения номинальной статической характеристики (НСХ) термопар соответствуют обозначениям стандарта МЭК 584-1, кроме термопары хромель-копель (L), не нормируемой данным стандартом.

2. По стандарту ФРГ DIN 43710 тип L соответствует термопаре Fe-Cu-Ni (железо-медь-никель), отрицательный термоэлектрод которой ближе по составу к копелю. Значение ее термоЭДС немного больше, чем у термопары железо-константан (J).

3. В колонке химического состава положительных электродов термопар в скобках указана цветовая кодировка электрода в соответствии со стандартом МЭК 584-3: Кор — коричневый; Ф — фиолетовый; Ч — черный; З — зеленый; О — оранжевый; Г — голубой.

Таблица 3.3. Рекомендуемые рабочие атмосферы и чувствительность термопар различных типов

Тип термопары	Рабочая атмосфера				Чувствительность в диапазоне температур	
	Окисли-тельная	Восстано-вительная	Инертная	Вакуум	Диапазон, °С	dE/dT, мкВ/°С
ТМКн (Т)	++	+	+	+	0 ... 400	40 ... 60
ТХК (L)	++	–	+	+	0 ... 600	64 ... 88
ТХКн (Е)	++	–	+	+	0 ... 600	59 ... 81
ТЖК (J)	++	++	+	+	0 ... 800	50 ... 64
ТХА (K)	++	–	+	+	0 ... 1 300	35 ... 42
ТНН (N)	++	–	+	+	0 ... 1 300	26 ... 36
ТПП (R, S)	++	–	+	+	600 ... 1 600	10 ... 14
ТПР (В)	++	–	+	+	1 000 ... 1 800	8 ... 12
ТВР	–	H2++	++	++	1 300 ... 2 500	14 ... 7

Примечания: 1. «++» — рекомендуемая атмосфера; «+» — эксплуатация в данной атмосфере возможна; «–» — нерекомендуемая атмосфера.

2. Под окислительной атмосферой обычно подразумевается воздух (21 об. % O_2) или смесь газов при избытке кислорода, в которой происходит окисление вещества (потеря атомами и ионами электронов). Слабоокислительная атмосфера содержит O_2 в смеси газов на уровне 2 ... 3 об.%. В восстановительной атмосфере идут химические реакции, в которых атомы и ионы присоединяют электроны. Примеры восстановительных сред — сухой H_2, CO, углеродсодержащие газовые среды, эндогаз, экзогаз, диссоциированный аммиак, выхлопные газы камер сгорания. Инертная атмосфера существует в газах N_2, Ar, He.

сухого водорода и азота, а также в вакууме. Основной недостаток состоит в плохой воспроизводимости термоЭДС, вынуждающей группировать термоэлектродные пары по номинальным статическим характеристикам А-1, А-2, А-3.

В промышленном производстве при термообработке в диапазоне 1 000 ... 1 600 °С обычно применяют платинородий-платиновые термопреобразователи ТПП10 и ТПП13. Модификация ТПП13 широко распространена в США. Термопары ТПП10 используются также в качестве эталонных средств.

Платина и платино-родиевые сплавы являются уникальными материалами для термопар. Их основное свойство — хорошее сопротивление газовой коррозии, особенно на воздухе при высоких температурах. Указанное свойство в сочетании с высокой температурой плавления и достаточно большой термоЭДС, хорошей совместимостью со многими изолирующими и защитными материалами, а также хорошей технологичностью и воспроизводимостью метрологических характеристик делает их незаменимыми при изготовлении электродов термопар для измерения высоких температур в окислительных средах.

Эти сплавы устойчивы в средах аргона и гелия, не растворяют азот и водород, не образуют нитридов и гидридов, не взаимодействуют с CO и CO_2.

Тем не менее, применять платинородий-платиновые термопреобразователи в восстановительных атмосферах не рекомендуется, так как в этом случае происходит загрязнение платины и платинородиевого сплава элементами, восстановленными из защитной или изолирующей керамики (обычно оксидной). До температуры 1 200 °C платина и ее сплавы с родием практически не взаимодействуют с огнеупорными материалами. При более высоких температурах чистота огнеупорного материала влияет на стабильность термопар. Наличие примеси SiO_2 (оксид кремния) в материале ведет к изменению термоЭДС, а в восстановительной атмосфере уже при температуре выше 1 100 °C разрушает платину из-за образования силицидов Pt_5Si_2 и легкоплавкой (t = 830 °C) эвтектики Pt-Pt_5Si_2.

Пары железа, хрома и марганца также представляют опасность для платиновых термоэлектродов, особенно в вакууме. Взаимодействие с парами металлов приводит к сильному дрейфу термоЭДС и преждевременному разрушению термопары. По этой причине платиновые термопары никогда не устанавливают непосредственно в металлические чехлы.

Из преобразователей на основе электродов из неблагородных металлов наиболее распространенными в России типами термопар являются хромель-копелевые (ТХК, тип L) и хромель-алюмелевые (ТХА, тип K).

Термопара ТХК (тип L) обладает наибольшей дифференциальной чувствительностью из всех промышленных термопар, применяется для точных измерений температуры, а также измерений малых температурных разностей. Технический ресурс термопар может составлять несколько десятков тысяч часов. К недостаткам ТХК можно отнести относительно высокую чувствительность к деформации.

Термопара ТХА (тип K) — самый распространенный термопреобразователь в промышленности и научных исследованиях. Термопара предназначена для измерения температуры до 1 100 °С (длительно) и 1 300 °С (кратковременно) в окислительных и инертных средах. Термопара широко используется во всех отраслях промышленности в печах, нагревательных устройствах, энергосиловом оборудовании. Номинальная статическая характеристика ТХА близка к линейной, дифференциальная термоЭДС составляет около 40 мкВ/°С во всем диапазоне измеряемых температур. Главное преимущество ТХА по сравнению с другими термопарами из неблагородных металлов состоит в значительно большей стойкости к окислению при высоких температурах.

Технический ресурс термопар при температурах менее 850 °С ограничивается только дрейфом термоЭДС, так как жаростойкость хромеля и алюмеля позволяет использовать их при этих температурах десятки тысяч часов.

В странах Западной Европы и США также широко применяются термопары нихросил-нисиловые (ТНН, тип N). Материалы термоэлектродов нихросил и нисил демонстрируют существенно лучшую стабильность термоЭДС по сравнению со сплавом ХА за счет увеличения концентрации хрома и кремния в никеле, а также введения в нисил магния, которые переводят процесс окисления материала термоэлектродов из внутреннего межкристаллического в поверхностный. Образующаяся на термоэлектродах защитная пленка оксидов подавляет дальнейшее окисление.

Основные варианты конструктивного исполнения термопар показаны на рис. 3.10, *г*...*е*.

Вариант бескорпусной тонкопроволочной термопары с открытым концом (см. рис. 3.10, *г*) обычно применяется для кратковременных измерений в лабораторных условиях или одноразовом использовании в промышленности. Отсутствие какой-либо механической защиты электродов снижает стоимость такой термопары и позволяет изготовлять ее непосредственно перед измерением из имеющихся электродов. Дополнительно термопара характеризуется минимальной инерционностью, зависящей только от толщины применяемых термоэлектродов.

Для долговременных измерений термоэлектроды помещают в защитный чехол из жаропрочной стали или керамики. Изоляция между электродами осуществляется с помощью фарфоровых бус (см. рис. 3.10, *g*). Однако инерционность такой термопары определяется теплопроводностью материала и толщиной стенки защитного чехла.

В настоящее время во всем мире широкое распространение получили термоэлектрические преобразователи, изготовляемые из термопарного кабеля (см. рис. 3.10, *е*). Он представляет собой гибкую металлическую трубку диаметром 1...7 мм с размещенными внутри нее одной или двумя парами термоэлектродов, расположенными параллельно друг другу. Пространство вокруг термоэлектродов заполнено сильно уплотненной мелкодисперсной минеральной изоляцией (обычно MgO).

Оболочка кабеля изготовлена из жаростойкой стали или сплава. Термопарный кабель за счет высокой плотности заполнения выдерживает изгиб на 180° вокруг цилиндра диаметром, равным пятикратному диаметру кабеля. Например, кабель диаметром 3 мм можно навить на трубу диаметром 15 мм. При этом не происходит замыкания электродов между собой или с оболочкой. Подобный тип термопар выпускается, например, ООО «Производственная компания «Тесей» (г. Обнинск).

Также существуют и другие конструкции термопар, определяемые в зависимости от места измеряемой температуры. Так, для измерения температуры поверхности могут использоваться термопары, у которых открытый спай выполнен в виде плоского диска, прижимаемого к поверхности.

3.5. ПРИНЦИПЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Нормирующие преобразователи. Понятие об унифицированных сигналах связи. Нормирующие преобразователи предназначены для преобразования естественных выходных сигналов первичных измерительных преобразователей в унифицированные сигналы связи.

Унифицированный сигнал связи — это такой сигнал, у которого вид носителя информации и диапазон его изменения не зависят от вида измеряемой величины, метода и диапазона измерения.

Диапазоны изменения унифицированных сигналов связи: 0...5 мА; 0...20 мА; 4...20 мА; 0...10 В.

Естественный выходной сигнал — это выходной сигнал первичных измерительных преобразователей, вид которого и диапазон изменения зависят от физического устройства преобразователя и диапазона измеряемой величины.

Для усиления естественных выходных сигналов от генераторных преобразователей или сигналов напряжения с измерительных мостов структурная схема нормирующего преобразователя имеет вид, показанный на рис. 3.11, *а*.

Нормирующий преобразователь строится по схеме усилителя постоянного тока с коэффициентом усиления прямой цепи — K, с отрицательной обратной связью с коэффициентом усиления обратной связи — $K_{ОС}$. Отрицательная обратная связь исключает самовозбуждение усилителя и стабилизирует его характеристики при изменении температуры окружающей среды.

В преобразователях с токовым выходным сигналом Y — ток нагрузки, в преобразователях с выходным сигналом по напряжению Y — напряжение на нагрузке. Связь между входом и выходом определяется по формуле

$$Y = \frac{K}{1 + KK_{ОС}} X.$$

Если $K \to \infty$, то $\lim Y = \lim \frac{K}{1 + KK_{ОС}} X = \frac{X}{K_{ОС}}$.

Таким образом, функция преобразования нормирующего преобразователя определяется свойствами звена обратной связи при большом коэффициенте усиления прямой цепи.

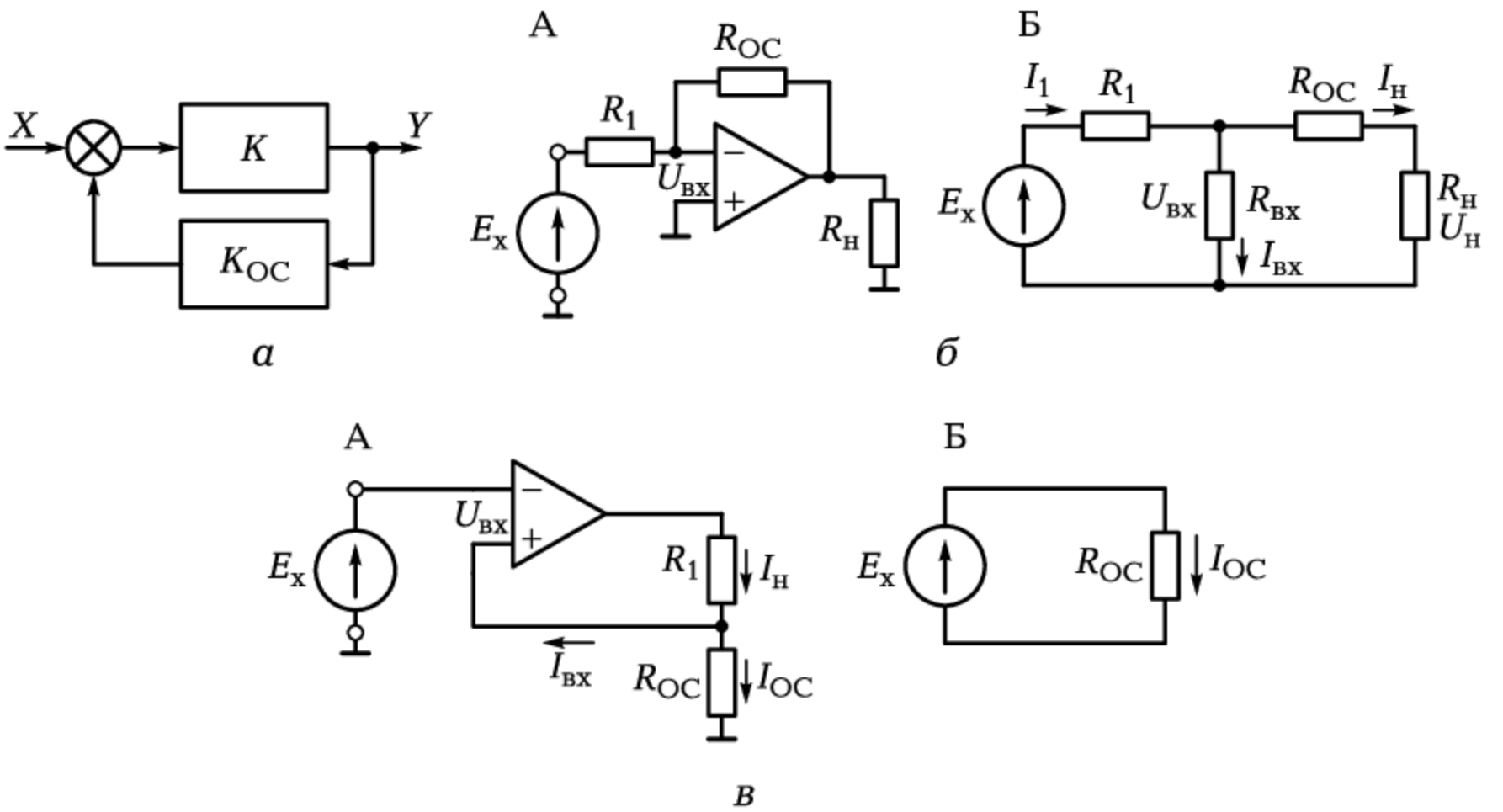


Рис. 3.11. Нормирующий преобразователь:

а — структурная схема; *б* — ПНН; *в* — ПНТ; А — электрическая схема на операционном усилителе; Б — эквивалентная электрическая схема

Для первичных генераторных преобразователей естественные выходные сигналы являются сигналами в виде напряжений. Унифицированные сигналы связи могут быть токовыми, а также в виде сигналов напряжения. Поэтому нормирующие преобразователи представляют собой либо преобразователь напряжения в напряжение (ПНН), либо преобразователь напряжения в ток (ПНТ).

Схема преобразователя ПНН на операционном усилителе и эквивалентная электрическая схема имеют вид, показанный на рис. 3.11, *б*.

Следует отметить, что при анализе схем полагают, что коэффициент усиления по напряжению $K_U \to \infty$, $R_{\text{вх}} \to \infty$, $R_{\text{вых}} \to \infty$. Поскольку $R_{\text{вх}} \to \infty$, входы операционного усилителя практически не потребляют ток от источника сигнала; так как $K_U \to \infty$, считают, что $U_{\text{вх}} \approx 0$.

Определим функцию, связывающую напряжение на выходе преобразователя с напряжением на входе, для чего рассмотрим соотношения (из эквивалентной электрической схемы):

$$E_{\text{х}} = I_1 R_1 + U_{\text{вх}}; \tag{3.9}$$

$$U_{\text{вх}} = I_{\text{н}} R_{\text{ОС}} + U_{\text{н}}; \tag{3.10}$$

$$I_1 = I_{\text{вх}} + I_{\text{н}};$$

$$I_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}.$$

Из (3.9) и (3.10) имеем:

$$I_1 = \frac{E_{\text{х}}}{R_1} - \frac{U_{\text{вх}}}{R_1};$$

$$I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{ОС}}} - \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{ОС}}}; \tag{3.11}$$

$$\frac{E_{\text{х}}}{R_1} - \frac{U_{\text{вх}}}{R_1} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}} + \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{ОС}}} - \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{ОС}}}.$$

Преобразуем полученное уравнение (3.11):

$$\frac{E_{\text{х}}}{R_1} + \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{ОС}}} = U_{\text{вх}} \left(\frac{1}{R_{\text{вх}}} + \frac{1}{R_{\text{ОС}}} + \frac{1}{R_1} \right).$$

Учтем что $U_{\text{вх}} \approx 0 \Rightarrow \frac{E_{\text{х}}}{R_1} + \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{ОС}}} \approx 0 \Rightarrow U_{\text{н}} = -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} E_{\text{х}}$.

Получившаяся функция — функция преобразователя ПНН.

Схема преобразователя ПНТ на операционном усилителе и его эквивалентная схема показана на рис. 3.11, *в*.

Определим функцию, связывающую ток на выходе преобразователя с напряжением на входе (из эквивалентной схемы):

$$I_{\text{ОС}} = \frac{E_{\text{х}}}{R_{\text{ОС}}};\ \ I_{\text{н}} = I_{\text{вх}} + I_{\text{ОС}};\ \ I_{\text{вх}} \approx 0;$$

$$I_{\text{н}} = I_{\text{ОС}} = \frac{E_{\text{х}}}{R_{\text{ОС}}}.$$

Получившаяся функция — функция преобразователя ПНТ.

Для параметрических первичных преобразователей выходная величина обычно представляется сопротивлением, емкостью и индуктивностью. Для преобразования таких величин в значение напряжения нередко используются мостовые измерительные схемы. Рассмотрим мостовую схему формирования сигнала $E_{\text{х}}$ для выходного сигнала, выраженного сопротивлением (рис. 3.12).

Определим функцию мостового преобразователя из следующих соотношений:

$$R'_3 = R_3 + R_{\text{л}}; \qquad (3.12)$$

$$R_4 = R_{\text{Т}} + R_{\text{л}}; \qquad (3.13)$$

$$\varphi_A = \frac{U_{\text{м}}}{R_1 + R_4} R_1; \qquad (3.14)$$

$$\varphi_B = \frac{U_{\text{м}}}{R_2 + R'_3} R_2, \qquad (3.15)$$

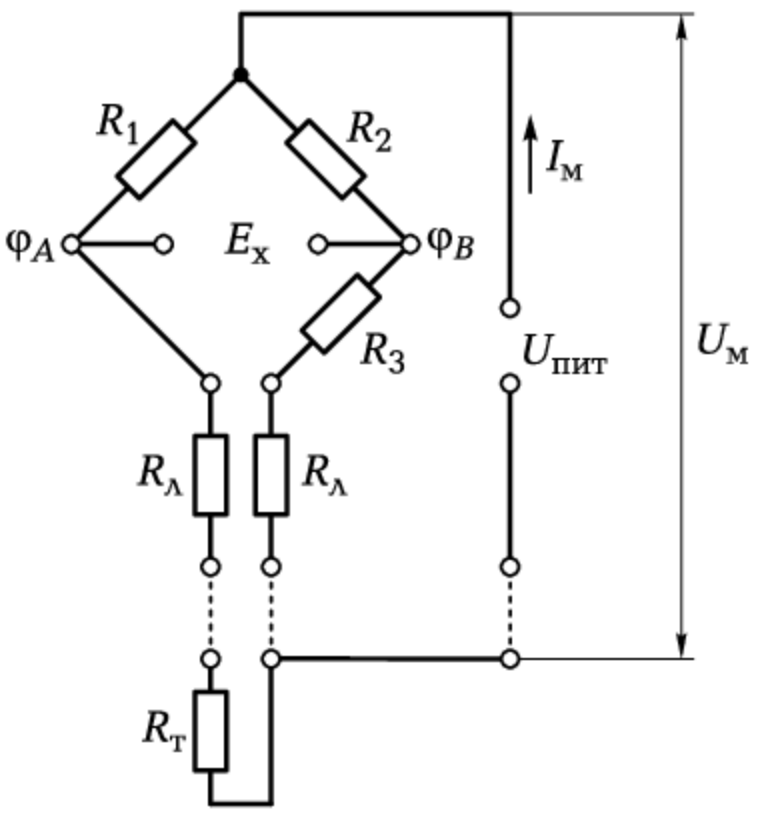
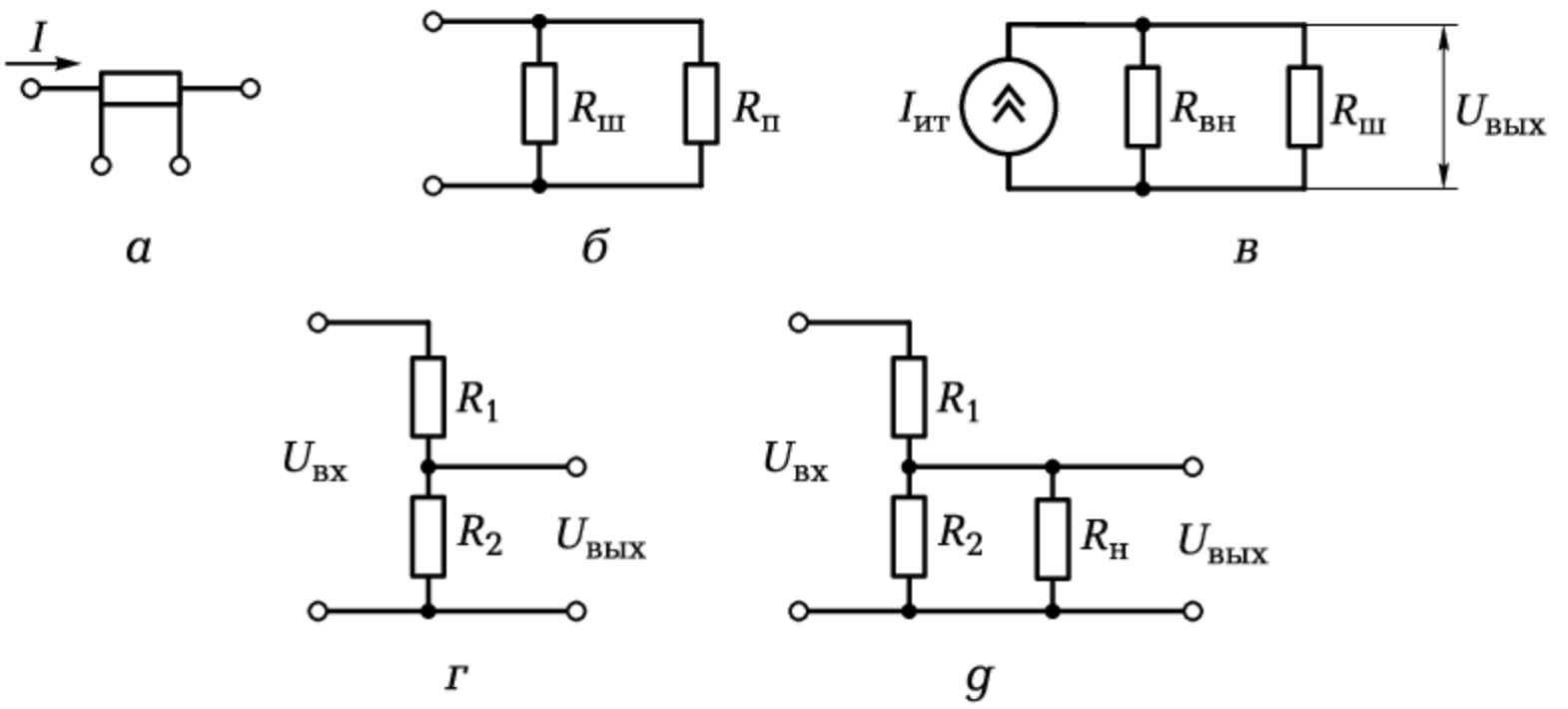


Рис. 3.12. Мостовая электрическая схема преобразования величины сопротивления $R_{\text{Т}}$ первичного преобразователя в значение напряжения $E_{\text{Х}}$



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 3.13. Шунт постоянного тока (*а*...*в*) и резисторный делитель напряжения (*г*, *д*):

а — зажимы шунта; *б* — подключение нагрузки $R_Н$; *в* — подключение к источнику тока $I_ИТ$; *г* — включение делителя; *д* — подключение нагрузки к делителю напряжения

где $R_1 ... R_3$ — сопротивление плеч моста; $R_л$ — сопротивление линий связи; $R_Т$ — сопротивление первичного преобразователя; $U_м$ — напряжение моста.

Из соотношений(3.12) — (3.15) функция преобразователя будет иметь вид:

$$E_х = \varphi_B - \varphi_A = U_м\left[\frac{R_2}{R_2 + R'_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4}\right].$$

Для выходных величин первичных параметрических преобразователей, представленных в виде емкости или индуктивности (т. е. в виде реактивных сопротивлений), используются также мостовые измерительные схемы переменного тока.

Для измерения электрических величин и формирования унифицированных сигналов широко распространены резисторные преобразователи токов и напряжений.

Простейшим измерительным преобразователем тока в напряжение является шунт постоянного тока (рис. 3.13, *а*...*в*), представляющий собой четырехзажимный резистор. Зажимы, к которым подводится ток, — токовые зажимы, а зажимы, с которых снимается напряжение, — потенциальные зажимы.

Для преобразования тока в напряжение шунт включается в цепь источника тока (см. рис. 3.13, *в*). При значительном превышении входного сопротивления, т. е. если $R_{вх} >> R_ш$, то $U_{вых} = I_{ИТ} R_ш$.

Нагрузка, подключаемая к шунту, изменяет входное сопротивление шунта (см. рис. 3.13, *б*):

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{н}} R_{\text{ш}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{ш}}} = \frac{R_{\text{ш}}}{1 + R_{\text{ш}}/R_{\text{н}}}.$$

Для того чтобы сопротивление шунта $R_{\text{ш}}$ в меньшей степени искажалось входным сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$, необходимо, чтобы $R_{\text{н}}$ имело как можно большее значение.

Для уменьшения напряжения в несколько раз применяют делители напряжения (рис. 3.13, *г*, *g*).

Отношение входного напряжения к выходному (коэффициент преобразования делителя) определяется отношением сопротивлений делителя по формуле

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{\dfrac{U_{\text{вх}}}{R_1 + R_2} R_2}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Нагрузка, подключенная к делителю (см. рис. 3.13, *g*), также изменяет коэффициент преобразователя делителя согласно формуле

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{U_{\text{вх}}} \left(\frac{U_{\text{вх}}}{R_1 + \dfrac{R_2 R_{\text{н}}}{R_2 + R_{\text{н}}}} \frac{R_2 R_{\text{н}}}{R_2 + R_{\text{н}}} \right) =$$

$$= \frac{1}{\dfrac{R_1 (R_{\text{н}} + R_2)}{R_2 R_{\text{н}}} + 1} = \frac{R_2 R_{\text{н}}}{R_1 (R_{\text{н}} + R_2) + R_2 R_{\text{н}}} = \frac{R_2}{R_1 \left(\dfrac{R_2}{R_{\text{н}}} + 1 \right) + R_2}.$$

Для уменьшения погрешности преобразования напряжения в напряжение с помощью резисторных преобразователей необходимо по возможности увеличивать сопротивление нагрузки делителя.

Расчетные эквиваленты реальных источников электрических сигналов. Любой источник электрического сигнала характеризуется ЭДС $E_{\text{х}}$ и внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}}$. Если под влиянием ЭДС через этот источник протекает ток I, то напряжение на зажимах источника будет равно:

$$U = E_{\text{х}} - R_{\text{вн}} I.$$

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) источника электрического сигнала имеет в этом случае вид, показанный на рис. 3.14, *а*.

К источнику электрического сигнала подключается нагрузка, поэтому напряжение на зажимах источника U равно напряжению на этой нагрузке.

С увеличением внутреннего сопротивления $R_{вн}$ тангенс угла наклона α ВАХ растет. Рассмотрим два предельных случая.

Случай 1. $R_{вн} = 0$. Такой идеализированный источник электрического сигнала называется источником ЭДС (обозначается на схемах (↑)). Стрелка показывает направление возрастания потенциала внутри ЭДС. Источник ЭДС — это такой идеализированный источник электрического сигнала, напряжение на зажимах которого постоянно, равно величине ЭДС E и не зависит от тока, потребляемого нагрузкой. Вольт-амперная характеристика такого источника показана на рис. 3.14, *б*.

Случай 2. $E \to \infty$; $R_{вн} \to \infty$; $\mathrm{tg}\alpha \to \infty$; $\alpha \to 90°$.

Такой идеализированный источник электрического сигнала называется источником тока (обозначается на схемах как (⇈)). Стрелка показывает направление тока внутри источника. Источник тока —

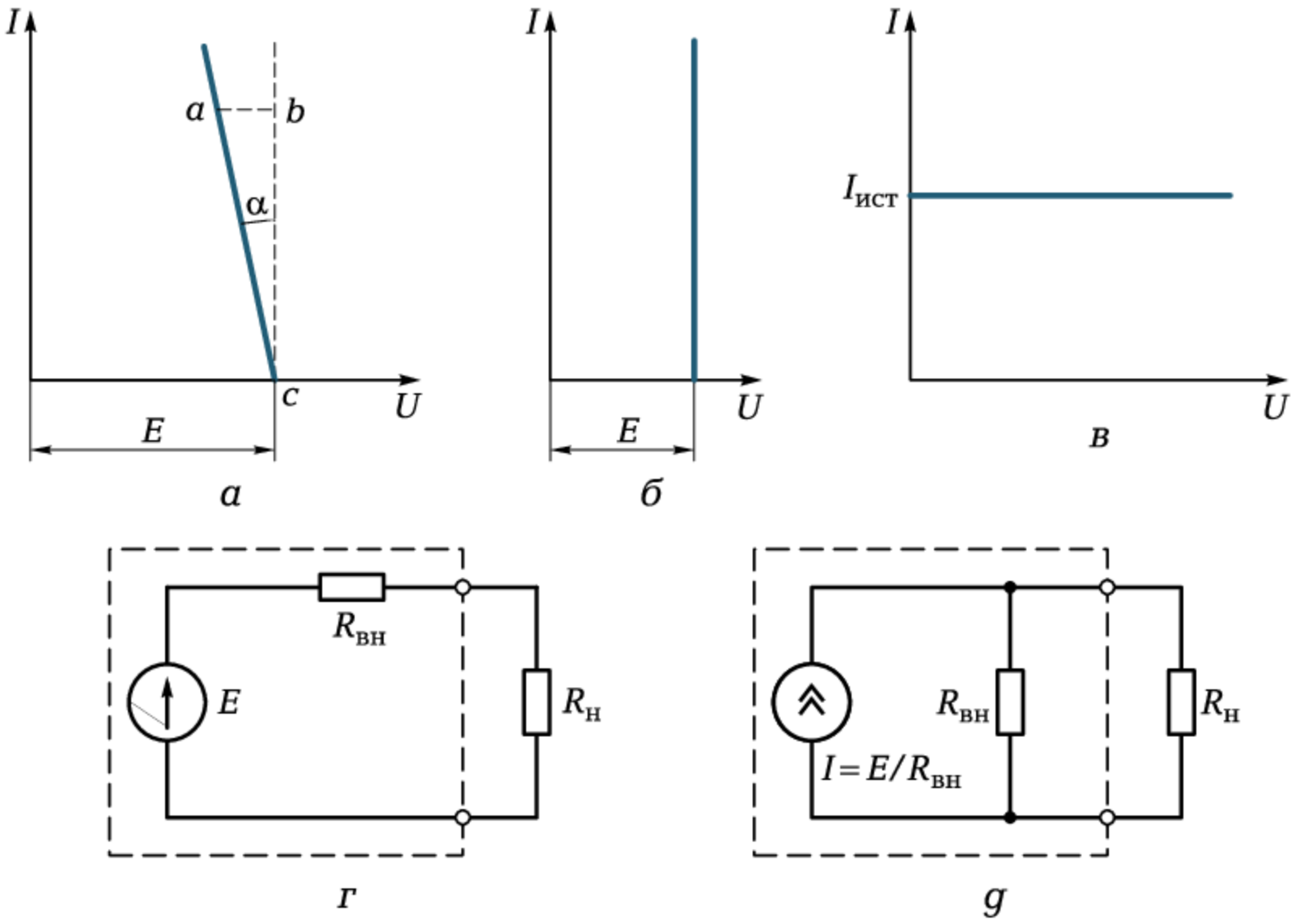


Рис. 3.14. Вольт-амперные характеристики (*а*...*в*) и расчетные эквиваленты реальных источников электрических сигналов (*г*, *д*):

а — ВАХ реального источника ЭДС; *б* — ВАХ идеального источника ЭДС; *в* — ВАХ идеального источника тока; *г* — эквивалент в виде источника ЭДС; *д* — эквивалент в виде источника тока

это такой идеализированный источник электрического сигнала, ток которого не зависит от сопротивления нагрузки. Вольт-амперная характеристика такого источника показана на рис. 3.14, *в*.

При анализе электрических схем контроля реальные источники электрических сигналов заменяют их расчетными эквивалентами, в качестве которых могут выступать:

1) источник ЭДС с последовательно включенным сопротивлением $R_{вн}$, равным внутреннему сопротивлению источника электрического сигнала (рис. 3.14, *г*);

2) источник тока с током источника $I_{ист} = E/R_{вн}$ и параллельно включенным сопротивлением $R_{вн}$, равным внутреннему сопротивлению источника электрического сигнала (рис. 3.14, *g*).

В виде первого расчетного эквивалента удобно представлять термопары, а также различные нормирующие преобразователи с выходным сигналом в виде напряжения. Эти преобразователи выполняются таким образом, что их внутреннее сопротивление $R_{вн}$ можно считать практически равным нулю по сравнению с сопротивлением нагрузки $R_{н}$. В этом случае выходной сигнал преобразователей не будет практически зависеть от сопротивления $R_{н}$ (т. е. тока, потребляемого нагрузкой). Следовательно, информация, заключенная в величине напряжения сигнала, теряться не будет.

В виде второго расчетного эквивалента удобно представлять все нормирующие преобразователи с токовым выходным сигналом. Эти преобразователи выполняются так, что $R_{вн} \gg R_{н}$, следовательно, информация, заключенная в величине тока, не будет потеряна вследствие утечки тока через $R_{вн}$.

Определение параметров расчетного эквивалента источника электрического сигнала. Как известно, в любой схеме можно выделить одну ветвь, а остальную часть схемы, независимо от ее сложности и структуры, условно изобразить прямоугольником с двумя полюсами — двухполюсником.

Если внутри двухполюсника имеются источники ЭДС или источники тока, то такой двухполюсник называют *активным* и на схемах внутри прямоугольника ставится буква *А*; в противном случае (при отсутствии источников ЭДС и источников тока) — *пассивным*, и внутри прямоугольника ничего не ставят (или ставят букву *Р*).

При анализе схем контроля и автоматического регулирования всякие измерительные схемы и измерительные преобразователи нужно представлять активными двухполюсниками. Приемники электрических сигналов, например вторичные преобразователи, — это пассивные двухполюсники.

Всякий двухполюсник может быть представлен тем или иным расчетным эквивалентом, обычно — так называемым эквивалентным генератором, ЭДС которого равна напряжению холостого хода на зажимах двухполюсника, а внутреннее сопротивление $R_{вн}$ равно входному сопротивлению относительно зажимов двухполюсника, т. е. используется первый расчетный эквивалент (см. рис. 3.14, *г*).

Напряжение холостого хода ($U_{хх}$) может быть определено двумя способами:

- проведением опыта холостого хода, когда при отключенной нагрузке $R_н$ напряжение на зажимах двухполюсника измеряется вольтметром с малым потреблением тока, т. е. с большим $R_{вх}$;
- расчетным путем при отключенной нагрузке $R_н$.

Внутреннее сопротивление $R_{вн}$ также можно определить двумя способами:

- опытом короткого замыкания, когда $R_н = 0$:

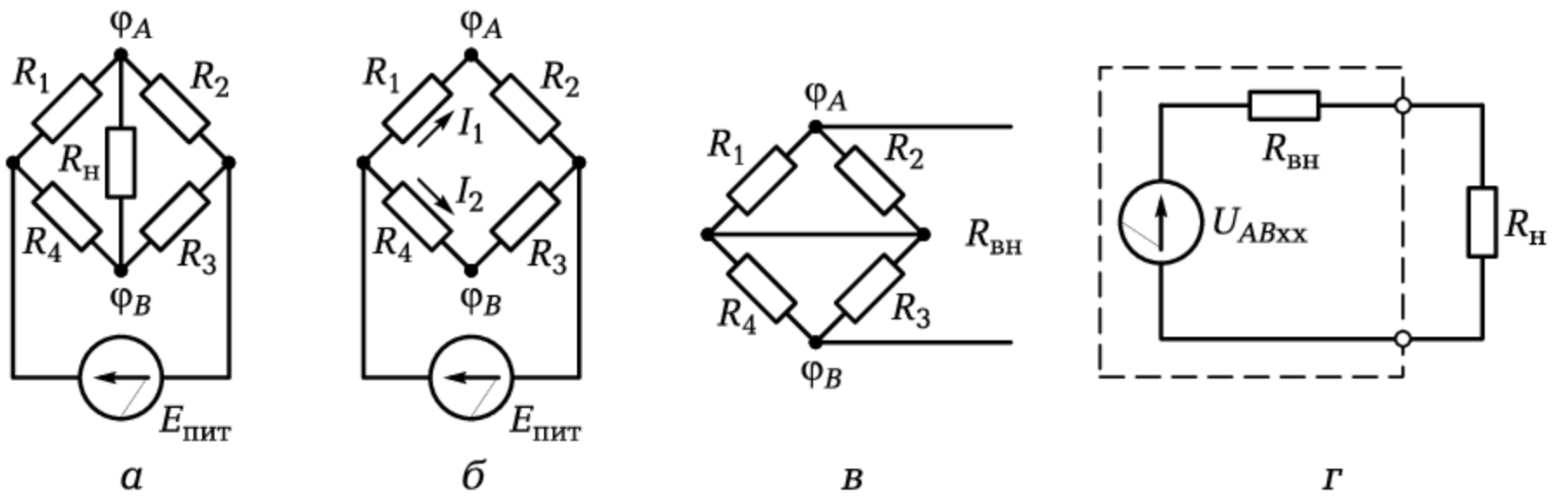
$$I_{кз} = \frac{U_{хх}}{R_{вх}} \rightarrow R_{вн} = \frac{U_{хх}}{I_{кз}},$$

где $I_{кз}$ определяется амперметром.

- расчетным путем при закороченных источниках ЭДС (так как внутреннее сопротивление источников ЭДС равно нулю) и разомкнутых источниках тока (так как внутреннее сопротивление источника тока равно ∞).

Пример. Рассмотрим представление мостовой измерительной схемы первым расчетным эквивалентом (рис. 3.15, *а*).

Входное сопротивление приемника электрического сигнала равно $R_{вн}$. Находим напряжение холостого хода $U_{хх}$ при отключенной нагрузке $R_н$



а *б* *в* *г*

Рис. 3.15. Шаги представления мостовой схемы расчетным эквивалентом:

а — исходная мостовая схема; *б* — определение $U_{хх}$; *в* — определение $R_{вн}$; *г* — представление первым расчетным эквивалентом

(рис. 3.15, *б*). Выразим напряжение холостого хода через потенциалы φ_A и φ_B используя второе правило Кирхгофа:

$$\varphi_A = \varphi_B + I_2 R_4 - I_1 R_1; \tag{3.16}$$

$$I_1 = \frac{E_{\text{пит}}}{R_1 + R_2}; \tag{3.17}$$

$$I_2 = \frac{E_{\text{пит}}}{R_3 + R_4}. \tag{3.18}$$

Подставив (3.17), (3.18) в (3.16) получим:

$$\varphi_A = \varphi_B + \frac{E_{\text{пит}}}{R_3 + R_4} R_4 - \frac{E_{\text{пит}}}{R_1 + R_2} R_1. \tag{3.19}$$

Из (3.19) выразим напряжение холостого хода $U_{AB\text{хх}}$, получим:

$$U_{AB\text{хх}} = \varphi_A - \varphi_B = E_{\text{пит}} \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) =$$

$$= E_{\text{пит}} \frac{R_1 R_4 + R_2 R_4 - R_1 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = E_{\text{пит}} \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}.$$

При равновесии моста, т. е. когда $R_2 R_4 = R_1 R_3$ напряжение $U_{AB\text{хх}} = 0$.

Определим сопротивление $R_{\text{вн}}$ при отключенной нагрузке $R_{\text{н}}$ и закороченной ЭДС $E_{\text{пит}}$ (см. рис. 3.14, *в*), получим:

$$R_{\text{вн}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}.$$

Схема, представленная в виде первого расчетного эквивалента, изображена на рис. 3.15, *г*. Первый расчетный эквивалент всегда может быть заменен вторым расчетным эквивалентом (см. рис. 3.14, *g*). Если двухполюсник пассивный, то он представляется одним внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}}$.

Особенности совместной работы источников и приемников электрических сигналов. Если к источнику электрических сигналов подключен электрический измерительный прибор, то от источника потребляется некоторая мощность. Это искажает режим работы источника электрического сигнала, что приводит к возникновению погрешности метода измерения или метода передачи токов и напряжений.

Для расчета погрешности нужно знать параметры расчетного эквивалента источника электрического сигнала.

Приемник электрического сигнала по отношению к источнику является нагрузкой, поэтому его входное сопротивление обозначается через $R_{\text{н}}$. Рассмотрим схему измерения или передачи электрического сигнала с помощью первого расчетного эквивалента (см. рис. 3.14, *г*).

Носителем информации в такой схеме является величина напряжения. Поэтому, чем ближе будет напряжение на нагрузке $U_н$ к напряжению источника электрического сигнала, тем меньше будет погрешность измерения или передачи сигнала.

Относительная погрешность:

$$\sigma = \frac{U_{xx} - U_н}{U_{xx}} 100\ \%. \qquad (3.20)$$

Напряжение на нагрузке:

$$U_н = \frac{U_{xx}}{R_{вн} + R_н} R_н. \qquad (3.21)$$

Подставив (3.21) в (3.20), получим выражение для вычисления относительной погрешности передачи информационных сигналов, представленных в виде напряжения:

$$\sigma = \frac{1}{U_{xx}} \left(U_{xx} - \frac{R_н}{R_{вн} + R_н} U_{xx} \right) 100\ \% =$$

$$= \left(1 - \frac{R_н}{R_{вн} + R_н} \right) 100\ \% = \frac{R_{вн}}{R_{вн} + R_н} 100\ \%.$$

Отсюда следует, что чем больше сопротивление $R_н$ (входное сопротивление приемника электрического сигнала), тем меньше относительная погрешность передачи сигнала. По этой причине в технических описаниях на преобразователи с выходным сигналом в виде напряжения всегда указывают нижнюю границу для сопротивления нагрузки $R_н \geq R_{нmin}$.

Рассмотрим схему измерения (или передачи информационного сигнала) со вторым расчетным эквивалентом (см. рис. 3.14, *g*). Здесь информация заключена в силе тока $I_{ИТ}$.

Относительная погрешность:

$$\sigma = \frac{I_{ИТ} - I_н}{I_{ИТ}} 100\ \%. \qquad (3.22)$$

Ток через нагрузку:

$$I_н = I_{ИТ} \frac{R_{вн} R_н}{(R_{вн} + R_н) R_н}. \qquad (3.23)$$

Подставив (3.23) в (3.22), получим выражение для определения относительной погрешности:

$$\sigma = \frac{1}{I_{\text{ИТ}}}\left(I_{\text{ИТ}} - I_{\text{ИТ}} \frac{R_{\text{вн}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}} \right) 100\,\% =$$

$$= \left(1 - \frac{R_{\text{вн}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}} \right) 100\,\% = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}} 100\,\%.$$

Чем меньше сопротивление $R_{\text{н}}$ (входное сопротивление приемника тока), тем меньше относительная погрешность измерения или передачи тока. По этой причине в технических описаниях на преобразователи с токовым выходным сигналом всегда указывают верхнюю границу на сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} \le R_{\text{нmin}}$.

Сигналы дистанционной связи в системах автоматизации. Выбор того или иного сигнала зависит от вида передаваемой информации, активного сопротивления кабеля, утечки тока из-за несовершенства изоляции и максимальной длины линии связи.

Различают два вида сигналов дистанционной связи: непрерывные (аналоговые) и дискретные (цифровые).

Термин «*аналоговый*» указывает на то, что данная величина представляется с помощью сходной величины — аналога (например, температура с помощью напряжения или тока в линии связи).

Термин «*непрерывный*» подчеркивает свойство таких величин — отсутствие разрывов между значениями, которые может принимать данная величина.

Дискретные величины принимают не все возможные, а лишь строго определенные (например, «0» или «1») значения.

Также дискретные сигналы часто называют цифровыми, так как каждому значению дискретного сигнала можно поставить в соответствие какую-либо цифру определенной системы счисления.

В ***непрерывных сигналах*** связи информация заключена либо в величине напряжения, либо в величине тока.

Эквивалентная электрическая схема линии связи для случая, когда носителем информации является ЭДС датчика, имеет вид первого расчетного эквивалента (см. рис. 3.14, *г*).

Напряжение на нагрузке определится следующим образом:

$$U_{\text{н}} = \frac{E}{R_{\text{л}} + R_{\text{н}}} R_{\text{н}},$$

где $R_{\text{л}}$ — сопротивление проводов линии связи.

Напряжение на нагрузке при неизменной ЭДС датчика будет изменяться при изменении сопротивления проводов линии связи $R_{\text{л}}$, что крайне нежелательно, так как приводит к возникновению погрешности передачи информации.

Другими словами, всякое отклонение сопротивления линии связи от того значения, при котором производилась градуировка приемника электрического сигнала, приводит к возникновению погрешностей передачи информации.

Эквивалентная электрическая схема токовой системы передачи имеет вид второго расчетного эквивалента (см. рис. 3.14, *g*).

При такой схеме как бы не изменялось сопротивление проводов линии связи $R_л$, ток через нагрузку будет равен току датчика. Следовательно, в идеале токовая система передачи имеет нулевую погрешность.

Таким образом, с точки зрения получения малой погрешности передачи информации следует использовать токовые системы связи.

Однако следует иметь в виду, что токовая система передачи имеет некоторую погрешность, связанную с утечкой тока между жилами кабеля из-за несовершенства изоляции. Сопротивление утечки между жилами кабеля $R_{ут}$ уменьшается с увеличением длины кабеля. Кабель обладает известным сопротивлением утечки на погонный метр. На эквивалентной электрической схеме его изображают в виде сосредоточенной величины $R^0_{ут}$.

Увеличение длины кабеля приводит к появлению на эквивалентной электрической схеме дополнительного параллельно включенного сопротивления $R^0_{ут}$.

Определим погрешность токовой системы передачи при конечном значении сопротивления нагрузки $R_н$. Относительная погрешность составит:

$$\sigma = \frac{I - I_н}{I} 100\ \%;$$

$$I_н = I \frac{R_{ут}\left(\frac{R_л}{2} + R_н\right)}{\left(R_{ут} + \left(\frac{R_л}{2} + R_н\right)\right)\left(\frac{R_л}{2} + R_н\right)},$$

откуда

$$\sigma = \left(1 - \frac{R_{ут}}{R_{ут} + \frac{R_л}{2} + R_н}\right) 100\ \%.$$

После преобразований получим выражение для определения относительной погрешности через сопротивления $R_л$, $R_н$, $R_{ут}$:

$$\sigma = \frac{R_л/2 + R_н}{R_{ут} + \frac{R_л}{2} + R_н} 100\ \%.$$

Обычно $R_л \gg R_н$, $R_н \gg R_{ут}$, поэтому можно упростить выражение для определения относительной погрешности:

$$\sigma = \frac{R_н}{R_{ут}} 100\ \%.$$

Пример. Определим сопротивление утечки $R_{ут}$ при заданной погрешности $\sigma \le 0{,}1\ \%$:

$$\frac{R_н}{R_{ут}} 100\ \% \le 0{,}1\ \% \Rightarrow R_{ут} \ge 10^3 R_н.$$

При $R_н = 3$ кОм, $R_{ут} \ge 3 \cdot 10^6$ Ом = 3 МОм.

Это условие выполняется при использовании обычного кабеля ПВ и ПГВ при температуре в зоне прокладки до 50 °С и длине линии связи до 10 км.

Если температура в зоне прокладки кабеля будет равна 20 °С, то длина линии связи при использовании такого кабеля может быть увеличена до 65 км.

Таким образом, для протяженных линий связи следует применять токовую систему передачи информации. Между тем известно, что конструкция приборов с выходным сигналом по напряжению является весьма простой, поэтому применяют комбинированную систему сигналов связи: токовую — для передачи сигналов от удаленных датчиков к приборам центральной части системы и по напряжению — между приборами центральной части системы.

Дискретные сигналы связи используются как в качестве информационных сигналов, так и для управления удаленными исполнительными устройствами. Последнее обусловлено тем, что управление исполнительными устройствами требует сигналов большой мощности.

При передаче мощных сигналов большое значение имеет КПД линии связи.

Из курса электротехники известно, что КПД линии связи будет тем выше, чем больше напряжение в линии и чем меньше ток. КПД линии связи определяется из выражения:

$$\eta = \frac{P_н}{P_1},$$

где $P_1 = U_1 I$ — мощность, потребляемая от источника напряжения, которая складывается из мощности, потребляемой нагрузкой $P_н$, и мощности, рассеиваемой в линии связи:

$$P_1 = P_н + I^2 R_л.$$

Отсюда

$$P_н = P_1 - I^2 R_л.$$

Следовательно, КПД линии связи можно выразить так:

$$\eta = \frac{P_1 - I^2 R_л}{P_1} = \frac{U_1 I - R_л I^2}{U_1 I} = 1 - \frac{R_л I^2}{U_1}.$$

Таким образом, использование токовых сигналов для управления удаленными исполнительными механизмами энергетически невыгодно. Энергетически более выгодно и технически более удобно применять для этого дискретные сигналы напряжения.

Дискретные сигналы напряжения кодируются (условно обозначаются) цифрами и знаками.

Например, при управлении исполнительными устройствами постоянного тока в системах управления условному нулю соответствует отсутствие напряжения между средним проводом и крайними проводами. Сигналу «+1» соответствует напряжение переменного тока 220 В между проводами «Ср.» и «Б»; сигналу «−1» — напряжение между проводами «Ср.» и «М». Также для передачи дискретных сигналов в технологических системах могут использоваться и другие уровни напряжения (24, 110 и 115 В).

Протяженность и помехозащищенность такой линии связи обеспечиваются большими допусками значения условного нуля и условной единицы, при которых сохраняется нормальная работа приемника сигнала (например, для большинства технологических управляющих контроллеров под условным «0» понимается напряжение постоянного тока, изменяющегося в диапазоне 0 ... 7 В, а под логической «1» — напряжение постоянного тока 18 ... 30 В.

Схемы подключения потребителей токового сигнала с защитой цепи от разрыва. Потребители токового сигнала подключаются к источнику сигнала последовательно, поэтому при отключении какого-либо потребителя отключаются и другие потребители токового сигнала. Для предотвращения этого параллельно зажимам каждого потребителя токового сигнала включается защитное устройство, которое представляет собой стабилитрон. Схема включения стабилитрона показана на рис. 3.16, *а*.

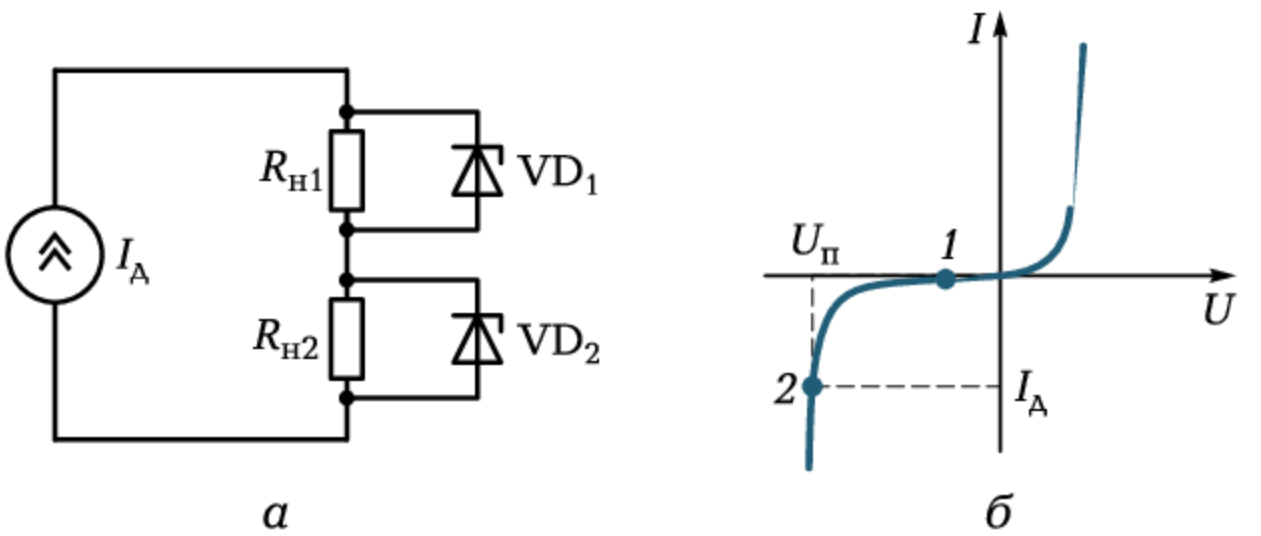


Рис. 3.16. Схема подключения потребителей токового сигнала с защитой цепи от разрыва:

а — включение стабилитрона в цепь; *б* — вольт-амперная характеристика стабилитрона

В нормальном режиме напряжение на стабилитроне будет равно напряжению на нагрузке: $U_н = I_д R_н$. Это напряжение будет значительно меньше порогового значения открытия стабилитрона $U_п$, т. е. $U_н < U_п$, поэтому стабилитрон будет закрыт и ток, текущий через него, будет примерно равен нулю (точка *1*, рис. 3.16, *б*).

При отключении нагрузки источник тока будет стремиться поддержать силу тока в цепи. Вследствие этого напряжение на стабилитроне резко возрастет, превысит пороговое значение $U_п$, стабилитрон откроется, и ток через него будет равен току источника (точка *2*, рис. 3.16, *б*).

Защитные устройства могут выпускаться в виде блоков и включаться в комплекты технических средств (КТС) (например, в КТС «КАСКАД» имеется защитное устройство В-01 ($U_п = 5{,}6$ В)).

Виды помех в линиях связи, причины возникновения и способы устранения. В практике эксплуатации автоматических устройств часто встречаются случаи, когда сигнал помехи действует последовательно с полезным сигналом во входной цепи прибора. Такую помеху называют помехой нормального вида, или ***поперечной помехой***.

Одной из причин возникновения поперечной помехи является действие электромагнитных полей на измерительный контур, в результате чего в нем наводится ЭДС. Другая причина возникновения поперечной помехи — паразитные индуктивные и емкостные связи между измерительными линиями и линиями, находящимися под потенциалом относительно «земли».

На рис. 3.17, *а* показано действие помехи E в измерительных цепях прибора, где C_1, C_2 — паразитные емкости; M_1, M_2 — паразитные индуктивные связи.

В данной схеме поперечная помеха будет проявлять себя в том случае, когда измерительный контур будет несимметричным, т. е. $M_1 \neq M_2$, $L_1 \neq L_2$, $R_{л1} \neq R_{л2}$, $C_1 \neq C_2$. На рис. 3.17, *б* изображена эквивалентная электрическая схема измерительной цепи прибора, отражающая влияние поперечной помехи.

Поперечная помеха представляет собой переменное напряжение, которое действует во входной цепи прибора последовательно с полезным сигналом, представляющим собой напряжение постоянного тока.

Наиболее эффективным способом подавления поперечной помехи является максимальное сближение проводов линии связи. При этом уменьшается площадь измерительного контура, а следовательно, и наводимая в нем ЭДС, выравниваются взаимные индуктивности M_1 и M_2, сопротивления проводов линии связи $R_{л1}$ и $R_{л2}$, а также паразитные емкости C_1 и C_2.

Если и в этом случае поперечная помеха будет недопустимо большой, то нужно проводить скручивание и экранирование проводов и по возможности уменьшать длину линии связи. Еще одним способом борьбы с поперечной помехой является применение фильтров низких частот.

Если помеха возникает между входом прибора и «землей» (корпусом прибора), то такую помеху называют ***продольной помехой***.

В образовании продольной помехи участвуют либо один, либо оба провода измерительной цепи, причем в последнем случае ток продольной помехи протекает по проводам в одинаковом направлении. Обратным проводом является «земля».

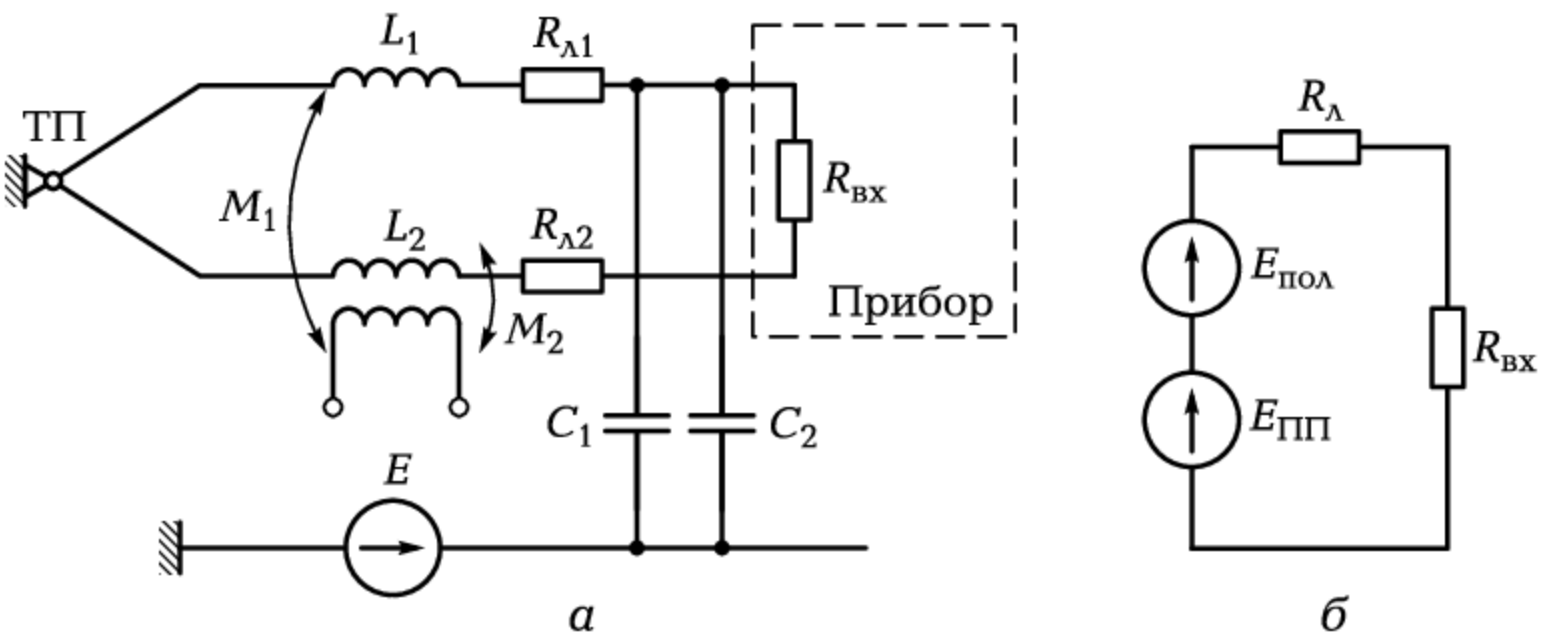


Рис. 3.17. Формирование поперечной помехи:

а — влияние паразитных индуктивных и емкостных связей между измерительными линиями и линиями, находящимися под потенциалом относительно «земли»; *б* — эквивалентная электрическая схема измерительной цепи, отражающая влияние поперечной помехи ($E_{пол}$ — полезная ЭДС; $E_{ПП}$ — ЭДС поперечной помехи)

Формирование продольной помехи в измерительной цепи прибора показано на рис. 3.18, *а*.

Определим величину помехи во входной цепи прибора.

Полное сопротивление Z_1 и Z_2 линий связи определяется отношениями:

$$Z_1 = R_{л1} + \frac{1}{j\omega C_1};$$

$$Z_2 = R_{л2} + \frac{1}{j\omega C_2}.$$

При условии $R_{вх} \gg Z_1, Z_2$ потенциалы на входе прибора (в точках A и B) составят:

$$\dot{\varphi}_A = \frac{\dot{E}}{Z_1}\frac{1}{j\omega C_1};$$

$$\dot{\varphi}_B = \frac{\dot{E}}{Z_2}\frac{1}{j\omega C_2}.$$

Тогда напряжение помехи на входе прибора:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{\varphi}_A - \dot{\varphi}_B = \dot{E}\left(\frac{1}{j\omega C_1 Z_1} - \frac{1}{j\omega C_2 Z_2}\right).$$

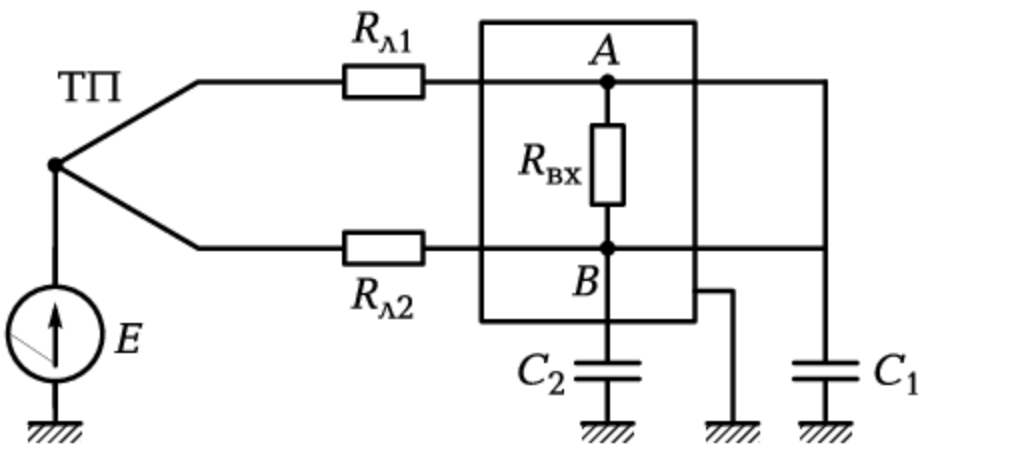


Рис. 3.18. Формирование продольной помехи в измерительной цепи прибора (*а*) и применение плавающего экрана во входных цепях прибора (*б*)

Если $R_{л1} = R_{л2}$, $C_1 = C_2$, то $\dot{U}_{AB} = 0$, т. е. продольная помеха не проявляет себя при симметрии измерительной цепи прибора, в противном случае продольная помеха проявляет себя, причем тем в большей степени, чем больше эта несимметричность.

Включение фильтра на входе прибора усиливает несимметричность измерительной цепи, вследствие чего влияние продольной помехи увеличивается. Кроме того, так как напряжение от продольной помехи выделяется на $R_{вх}$, то помеха действует в обход фильтра.

Наибольшему влиянию продольной помехи подвергаются измерительные цепи приборов, работающие в комплекте с термопарами, установленными на электрических печах сопротивления.

Термопару обычно монтируют вблизи нагревателя печи, на который подается напряжение сети. Между термопарой и потенциальным полюсом нагревателя всегда существует паразитная емкость и конечное сопротивление утечки $R_{ут}$. Обычно для уменьшения инерционности контуров регулирования термопару приваривают к нагревателю печи для уменьшения инерционности контура регулирования. Поэтому между термопарой и «землей» будет действовать переменное напряжение, которое на эквивалентной электрической схеме изображается в виде ЭДС.

Наиболее эффективным способом борьбы с продольной помехой является применение так называемого плавающего экрана. В этот экран помещают входные элементы прибора, на которых может выделяться напряжение продольной помехи, экран тщательно изолируют от корпуса прибора и соединяют с одним из проводов линии связи (рис. 3.18, *б*).

Если экранирование выполнено достаточно тщательно, то оно полностью устраняет паразитные емкостные связи между входными элементами прибора и «землей». Вместо них возникают паразитно-емкостные связи между входными элементами прибора и экраном (C_1 и C_2) и между экраном и «землей» (C_3).

Конструкция экрана должна обеспечивать минимальную паразитную емкость между экраном и корпусом прибора — емкость C_3.

Также одним из эффективных способов борьбы с продольной помехой является гальваническая изоляция цепей.

Гальваническая изоляция цепей источников и приемников электрических сигналов означает устранение непосредственной электрической связи между цепями. Для этого используются специальные узлы гальванического разделения цепей (гальванической развязки), в основном двух типов:

- разделительные трансформаторы;
- оптоэлектронные преобразователи.

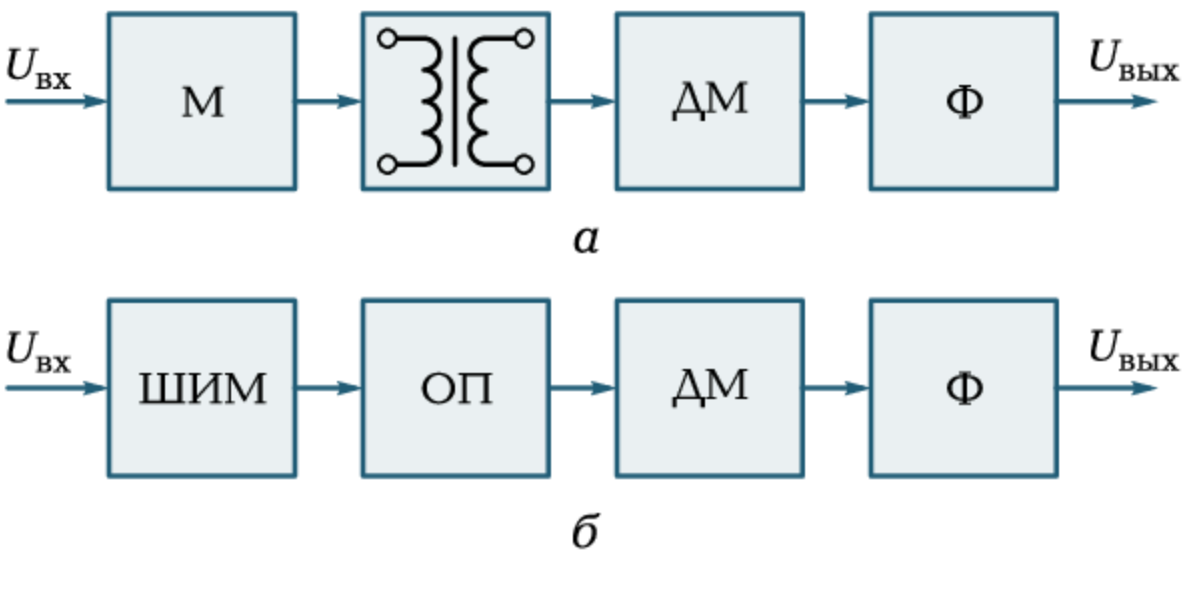


Рис. 3.19. Структурная схема узлов гальванического разделения:

а — с разделительным трансформатором; *б* — с оптоэлектронным преобразователем

При использовании любого типа узлов гальванического разделения полезный сигнал, который представляет собой напряжение постоянного тока, сначала применяют для модуляции несущих сигналов, а затем уже модулированный сигнал подается на узел гальванического разделения.

Гальваническая изоляция цепей позволяет локализовать помехи в одних контурах управления и не дает возможности этим помехам распространяться в другие контуры.

Гальваническое разделение цепей с использованием разделительного трансформатора (структурная схема узла гальванической развязки показана на рис. 3.19, *а*) осуществляется следующим образом.

В этой схеме сигнал напряжения постоянного тока используется модулятором (М) для модуляции несущей частоты. Затем модулированный сигнал подается на разделительный трансформатор и далее — на демодулятор (ДМ), который представляет собой фазочувствительный выпрямитель. После этого сигнал фильтруется фильтром (Ф).

Гальваническое разделение цепей с использованием оптоэлектронных преобразователей (структурная схема узла гальванической развязки (ОП) показана на рис. 3.19, *б*) осуществляется следующим образом.

В данной схеме сигнал напряжения постоянного тока подается на широтно-импульсный модулятор (ШИМ), который преобразует его в последовательность дискретных импульсов с постоянной частотой следования и скважностью, пропорциональной входному сигналу. Последовательность дискретных импульсов поступает на узел гальванического разделения — оптоэлектронный преобразователь, затем на демодулятор и фильтр.

Глава 4

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

4.1. СТРУКТУРА ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Сложность технологических процессов, требования к безопасности ведения процесса для технологического персонала, а также желание снизить стоимость системы автоматизации, включая стоимость владения, привели к тому, что большинство фирм-производителей оборудования для автоматизации технологических процессов начали разрабатывать и внедрять комплексные (интегрированные) решения по автоматизации процесса в целом, начиная от средств получения информации и реализации управляющих воздействий — датчиков и исполнительных устройств и заканчивая средствами человеко-машинного интерфейса и диспетчерского управления процессом, объединенные единой средой передачи информации.

Применение единых стандартов и типовых решений в создании такой интегрированной системы проектирования и управления (ИСПУ) позволяет снизить затраты на разработку, внедрение и обслуживание системы в целом, а комплексная подготовка специалистов из обслуживающего персонала — сократить сроки ремонтов и настройку оборудования.

Полностью интегрированные системы автоматизации (*Totally Integrated Automation*) представляют собой качественно новый метод унификации систем автоматизации мирового производства и технологии, в котором аппаратные и программные средства управления объединяются в единую систему.

Рассмотрим построение и использование таких систем на примере интегрированной системы фирмы Siemens семейства SIMATIC Totally Integrated Automation.

Интегрированные системы фирмы Siemens включают в себя следующие компоненты:

- системы автоматизации SIMATIC S7 и SIMATIC C7;
- системы распределенного ввода-вывода SIMATIC DP;
- промышленное программное обеспечение (ПО) SIMATIC MANAGER;
- программаторы SIMATIC PG;
- промышленные компьютеры SIMATIC PC;
- системы компьютерного управления SIMATIC WinAC;
- человеко-машинный интерфейс SIMATIC HMI WinCC;
- средства связи SIMATIC NET;
- системы управления производственными процессами SIMATIC PCS 7.

Как уже отмечалось, в целом проекты автоматизированных систем контроля и управления по функциям, выполняемым техническими средствами, подразделяют на три уровня (см. рис. 1.3).

На ***нижнем (полевом) уровне*** — уровне управляемого процесса — располагаются датчики и исполнительные устройства. Основное назначение полевого уровня — объединение всех сигналов устройств, расположенных непосредственно на объекте управления. Могут использоваться как классические аналоговые и дискретные датчики процесса, так и интеллектуальные, формирующие сигнал непосредственно в цифровом виде и передающие этот сигнал на уровень управления. В качестве среды передачи информации интеллектуальных датчиков используются промышленные сети протоколов AS-Interface и PROFIBUS.

Средний уровень интегрированной системы представлен программируемыми логическими контроллерами, реализующими основные алгоритмы управления локальными контурами отдельных элементов технологического процесса. Получая данные с датчиков полевого уровня по промышленной сети, программируемые контроллеры формируют сигналы управления исполнительными устройствами, которые передаются на нижний уровень.

Вся информация с управляющих контроллеров поступает в систему ***верхнего уровня***, реализующего функции визуализации процесса и человеко-машинного интерфейса.

Отдельно можно выделить *уровень средств разработки*, которые позволяют осуществить настройку контроллеров, включая их программирование, разработку интерфейсов оператора, «привязку» адресов сигналов с датчиков на исполнительные устройства к адресам контроллера, через которые производится обработка сигналов процессора.

Уровень управляющих контроллеров — основной уровень системы автоматизации технологического процесса. Сигналы с датчиков передаются в программируемые логические контроллеры (ПЛК — PLC), обрабатываются по заданным алгоритмам. В результате формируется управляющий сигнал на исполнительные устройства.

На этом уровне могут работать несколько контроллеров, представляющих собой распределенную систему управления и решающих одну задачу управления. Передача данных между отдельными контроллерами осуществляется посредством промышленной сети.

В качестве промышленной сети передачи данных наиболее распространены сети PROFIBUS. Под этим общим названием понимается совокупность трех различных, но совместимых протоколов: PROFIBUS-FMS, PROFIBUS-DP и PROFIBUS-PA.

Протокол общего назначения PROFIBUS-FMS разработан для связи контроллеров и интеллектуальных устройств. Основное его назначение — передача больших объемов данных.

Протокол PROFIBUS-DP используется для решения задач управления системами, которые должны функционировать в так называемом реальном времени, где главный параметр — продолжительность цикла передачи данных. Протокол PROFIBUS-DP обеспечивает максимально возможную для используемых условий и применяемых технических средств скорость передачи данных (например, для передачи 512 бит данных по 32 станциям требуется 6 мс).

Протокол PROFIBUS-PA применяется в устройствах, работающих в опасных производствах, требующих искробезопасного соединения и надежности в передаче сигнала.

Распределенная система управления может состоять из устройств, реализующих все три типа протокола.

Устройства сети PROFIBUS подразделяют на ведущие и ведомые. В структуре сети допускается использовать до 122 устройств, из которых до 32 могут быть ведущими. Ведущие устройства строго по порядку ведут опрос своих ведомых устройств. Время опроса одним ведущим устройством строго регламентировано. Протокол позволяет определять и исправлять ошибки, возникшие в процессе передачи данных.

Уровень человеко-машинного интерфейса (HMI — *Human-Machine Interface*) включает в себя одну или несколько станций управления, представляющих собой автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера/оператора; сервер базы данных; рабочие места (компьютеры) для специалистов и т. д.

Станции управления предназначены для отображения хода технологического процесса и оперативного управления. Специализированное ПО этих станций ориентировано на обеспечение интерфейса между диспетчером и системой управления, а также коммуникацию с внешним миром.

Однопользовательские системы АРМ применяют в небольших приложениях, но возможно их использование для управления и контроля в самостоятельных частях технологического процесса. Однопользовательская система работает независимо, т. е. она обеспечена всеми необходимыми для производства средствами.

Связь с уровнем автоматизации или сетью осуществляется, например, через соединения точка-точка. Как правило, контроллер ПЛК имеет шлюз для передачи данных в сеть Ethernet, к которой подключается станция оператора. В некоторых случаях интерфейсная плата подключения промышленной сети встраивается в станцию оператора.

Многопользовательские системы АРМ позволяют управлять технологическим процессом нескольким операторам, причем каждый может как вести управление отдельным участком технологической цепочки, так и контролировать действия операторов на других участках технологической цепочки.

Многопользовательские системы могут быть получены и в случае, когда требуется одновременно контролировать всю цепочку технологического процесса. При этом на каждом мониторе отображается часть цепочки, а управление всем процессом может вестись одним оператором, который переходит от одной части цепочки к другой.

Многопользовательские системы работают по принципу клиент-сервер. Сервер берет на себя задачи связи с технологическим процессом (уровнем контроллеров) и архивирование, а станции-клиенты получают данные от сервера, используя стандартный протокол TCP/IP и локальную сеть Ethernet.

Распределенная система АРМ с несколькими серверами. Распределение задачи управления технологическим процессом на несколько серверов обеспечивает высокую производительность системы в целом. Принципиальное значение имеет распределение типов задач по серверам (например, выделяются задачи архивирования, отображения графиков, аварийных сообщений и т. д.). Для повышения производительности используется несколько каналов передачи данных за счет применения нескольких коммуникационных процессоров для передачи данных от уровня контроллеров в сеть Ethernet и ее деления на несколько локальных подсетей.

4.2. СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ И ОТЛАДКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Общие сведения. Все процедуры, связанные с настройкой и программированием элементов интегрированной системы управления, проводятся с использованием специализированных программных пакетов. Рассмотрим пакет Simatic Manager для настройки контроллеров уровня управления семейства Simatic.

Пакет Simatic Manager является модульным пакетом, т. е. для выполнения каких-либо определенных действий используется своя программа.

В базовый комплект Simatic Manager входят языки программирования списка операторов (Statement list, STL), контактного (Ladder diagramm, LAD) и функционального плана или диаграммы функциональных блоков (Function block diagram, FBD). Кроме базового пакета также доступны такие пакеты, как S7-SCL (Structured control language — структурированный язык управления), S7-GRAPH (Sequence planning — последовательное планирование) и S7-HiGraph (State-transition diagram — диаграммы состояний-переходов).

Рассмотрим последовательность работы в данном пакете.

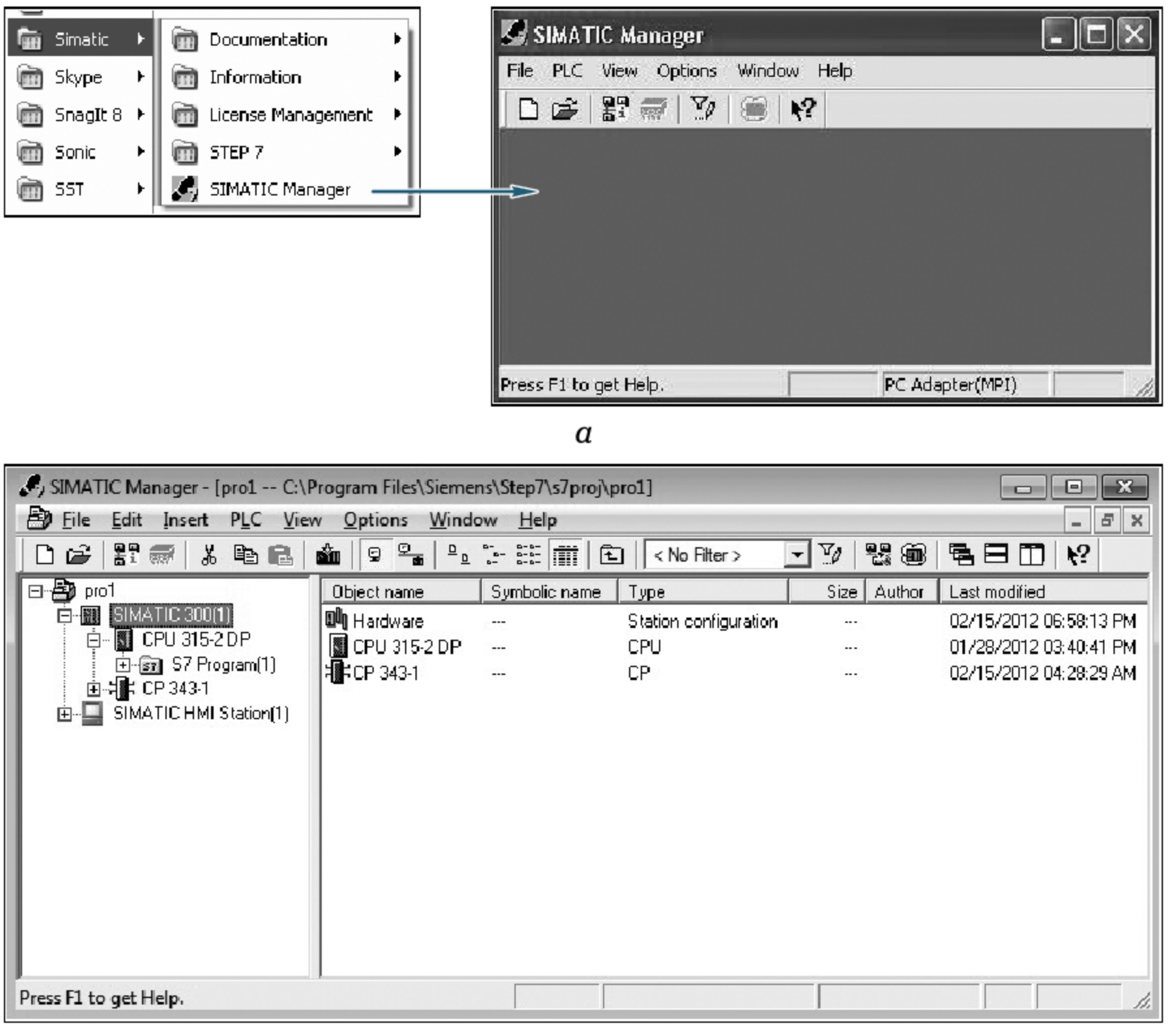
Последовательность операций создания нового проекта в пакете Simatic Manager. Создание нового проекта с использованием пакета утилит Simatic Manager предполагает следующую последовательность шагов:

- запустить Simatic Manager;
- используя утилиту создания нового проекта, создать проект: выбрать тип используемого CPU, тип организационного блока и язык программирования, и задать имя проекта;
- открыть созданный проект, выбрать в структуре проекта аппаратную часть, открыть утилиту конфигурирования и сконфигурировать аппаратную часть станции;
- открыть таблицу символов и задать символические имена;
- выбрать или создать программный блок, открыть утилиту редактора языка STEP 7, выполнить требуемое программирование;
- загрузить проект в контроллер и при необходимости протестировать его работу в режиме мониторинга.

Данная последовательность шагов по созданию рабочего проекта не является фиксированной — могут быть изменены как последовательность, так и количество шагов.

Запуск Simatic Manager и создание нового проекта. Запуск Simatic Manager осуществляется из главного меню или с помощью ярлыка, расположенного на рабочем столе. На рис. 4.1, *а* показан вид окна программы и метод запуска Simatic Manager. Для создания нового проекта необходимо в пункте меню <File> выбрать команду <'New Project' Wizard...>, которая запускает мастер создания нового проекта. Создание проекта с помощью мастера состоит из четырех шагов.

На первом шаге предполагается рассмотреть структуру будущего проекта (команда Preview>>). На втором шаге выбирается тип процессора, установленного в слот контроллера. На третьем шаге определяется вид представления логической программы. На четвертом шаге вводится имя проекта. После этого создается про-



а

б

Рис. 4.1. Создание проекта в среде Simatic Manager:

а — запуск основной программы; *б* — вид окна созданного проекта

ект и происходит его запись на диск. Вид окна созданного проекта показан на рис. 4.1, *б*.

Окно проекта разделено на три части: в левой части показана иерархическая структура проекта, в правой — содержимое каждого элемента этой структуры, в заголовке — имя проекта и физическое расположение его на диске.

После создания «пустого» проекта начинаются этапы наполнения отдельных его элементов. Эти этапы включают в себя операции по конфигурированию аппаратной части проекта, созданию таблицы символических имен используемых переменных, непосредственному созданию программной части проекта, запуску и отладки проекта.

Конфигурирование аппаратной части проекта позволяет занести в проект информацию о применяемой аппаратуре. Приводятся параметры по типу используемого процесса, модулям ввода-вывода (сигнальные модули), коммуникационным модулям и т. д. Также указывается информация по сетевой конфигурации контроллера и его взаимодействию с другими контроллерами промышленной сети.

Таблица символов необходима для установки символьных обозначений реальным адресам процессора. В этом случае символьное имя переменной становится синонимом реального адреса, в котором располагается данная переменная.

При *редактировании программой части проекта* с использованием одного или нескольких языков технологического программирования реализуется управляющий алгоритм. Вид окна утилиты редактора программы при редактировании языка S7 LAD показан на рис. 4.2.

Основы языка технологического программирования STEP 7. Основные понятия релейной логики. Группа языков технологического программирования STEP 7 позволяет реализовывать алгоритмы управления технологическими процессами, обладая при этом минимальными знаниями в области программирования и использования алгоритмических языков. Все языки этой группы соответствуют стандарту МЭК 61131-3.

Большинство алгоритмов управления реализуется с использованием программных элементов, выраженных в терминах и понятиях, свойственных системам автоматизации. Такой подход к разработке управляющих алгоритмов микропроцессорного контроллера позволяет использовать графическое представление программы управления, что значительно повышает ее читаемость и уменьшает количество ошибок.

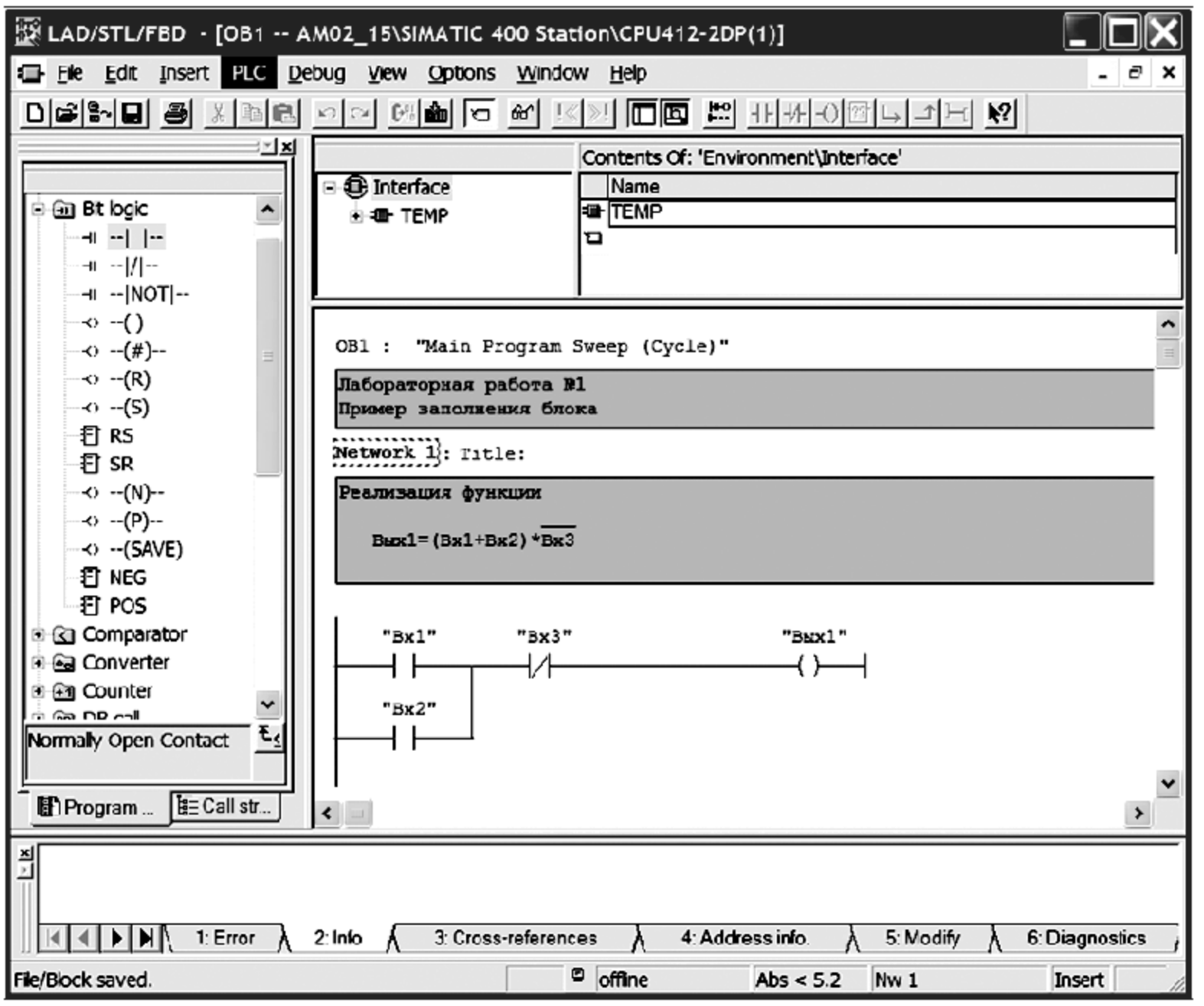


Рис. 4.2. Вид окна редактора программ

Принципиальной разницы в возможностях реализации управляющих алгоритмов между этими языками нет, однако некоторые алгоритмы, например алгоритмы с последовательной схемой включения, традиционно реализуются на языке S7-LAD, а некоторые, например алгоритмы обработки целых и вещественных величин, — на языке S7-STL.

В качестве пояснения принципа разработки программы рассмотрим примеры реализации некоторых релейных схем в виде реальных элементов (рис. 4.3).

Для программного формирования функций этих релейных схем проведем соответствие реальных элементов и их графических обозначений на языке LAD. На рис. 4.4 показаны соответствия элементов реальной электрической релейной схемы с обозначениями элементарных действий на языке LAD.

В соответствии с этими обозначениями программные аналоги схем, представленные на рис. 4.3, будут иметь вид, показанный на рис. 4.5. На программной реализации релейных схем отсутствуют промежуточные элементы. На схеме указаны только необходимые для реализации логической функции элементы.

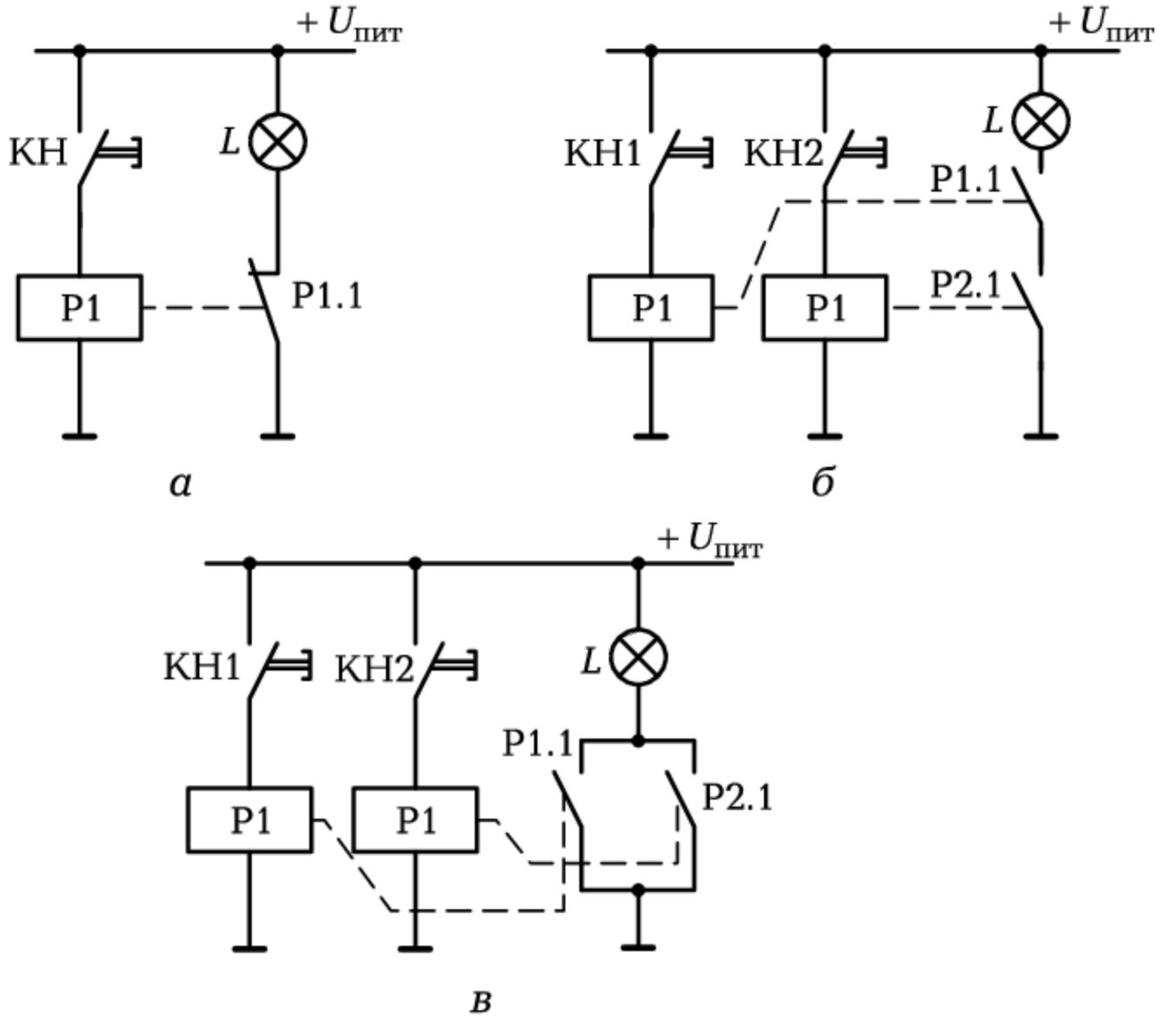


Рис. 4.3. Примеры электрических схем, реализующих основные логические операции релейных схем:

а — отрицание (НЕ); *б* — логическое умножение (И); *в* — логическое сложение (ИЛИ)

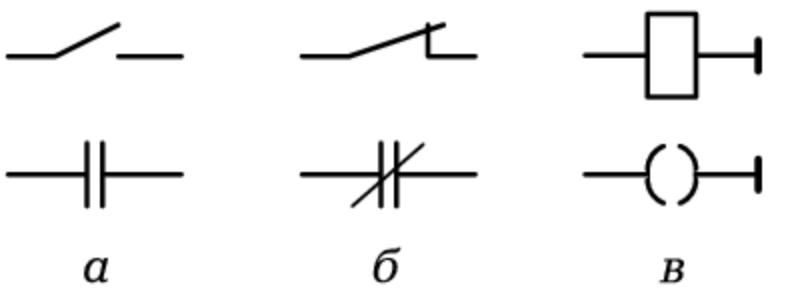


Рис. 4.4. Соответствие элементов реальной электрической релейной схемы (сверху) их графическим программным представлением на языке LAD (снизу):

а — нормально разомкнутый контакт; *б* — нормально замкнутый контакт; *в* — катушка реле

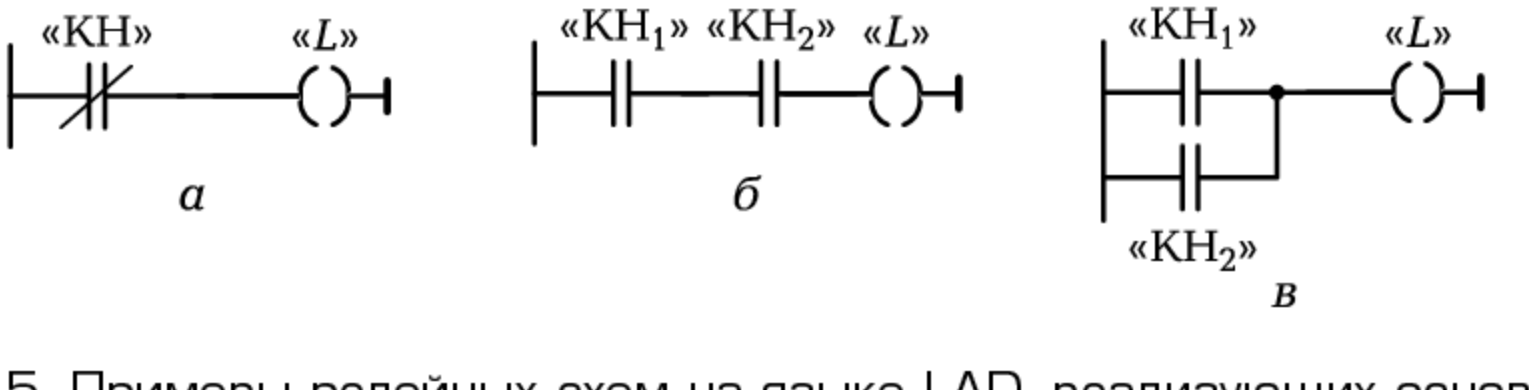


Рис. 4.5. Примеры релейных схем на языке LAD, реализующих основные логические операции в соответствии с рис. 4.3:

а — отрицание (НЕ); *б* — конъюнкция (И); *в* — дизъюнкция (ИЛИ)

Более сложные операции являются комбинацией элементарных операций.

Однако при проектировании релейной схемы на языке LAD имеется ряд о г р а н и ч е н и й:

- условное движение тока в цепи может происходить слева направо (от условного «+» сигнала к «общему»);
- недопустимы цепи, в которых отсутствуют контакты.

На языке STL релейные схемы описывают с помощью специального языка — списка операторов.

Для описания базовых операций языка STL служат следующие о п е р а т о р ы:

- **A**, **AN** — операция логического И, И с инверсией;
- **O**, **ON** — операция логического ИЛИ, ИЛИ с инверсией;
- **X**, **XN** — операция исключающего ИЛИ, исключающее ИЛИ с инверсией;
- = — катушка реле.

Команды записываются по строкам в той же последовательности, в которой происходит вычисление логического выражения.

Например, реализация основных логических операций на языке STL (см. рис. 4.5) запишется так:

отрицание (см. рис. 4.5, *а*):

```
AN «КН»
=    «L»
```

логическое И (см. рис. 4.5, *б*):

```
A «КН1»
A «КН2»
=  «L»
```

логическое ИЛИ (см. рис. 4.5, *в*):

```
O «КН1»
O «КН2»
=  «L»
```

Операция «Исключающее ИЛИ» не является элементарной логической операцией, однако в языке STL для этой операции предусмотрена команда.

Реализация операции «Исключающее ИЛИ» на языке STL может быть записана следующим образом:

```
X «КН1»
X «КН2»
=  «L»
```

4.3. СТРУКТУРА И СОСТАВ SCADA-СИСТЕМ. ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Верхний уровень АСУ ТП строится на основе SCADA-систем, которые являются наиболее перспективной технологией построения автоматизированных систем, основанных на диалоге с оператором. Системы SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных) нашли применение во многих отраслях промышленности, и интерес к этой технологии растет на протяжении последнего десятилетия.

В основе технологии SCADA лежат развитые средства человеко-машинного интерфейса, с помощью которого осуществляется наглядность представляемой информации о ходе технологического процесса, доступность «рычагов» управления процессом, широкая система подсказок и справочной информации.

Также следует отметить, что концепция SCADA предполагает сокращение сроков разработки проектов по автоматизации за счет использования готовых типовых решений и стандартных средств операционной системы, что ведет к сокращению прямых финансовых затрат на разработку.

Структура любой SCADA-системы обеспечивает реализацию следующих основных задач:

- визуализацию (отображение) технологического процесса на экране монитора;
- хранение технологических данных;
- взаимодействие с другими системами сбора и передачи данных;
- реализация алгоритмов поведения визуальных объектов на экране монитора;
- передача технологической информации в локальные сети и сеть Интернет и представление этой информации на информационных порталах.

Средства визуализации — одно из базовых свойств SCADA-систем. В основе пакета разработки лежит графический объектно-ориентированный редактор с определенным набором анимационных функций. Используемая векторная графика дает возможность осуществлять широкий круг операций над выбранным объектом. Объекты могут быть как простыми (линии, прямоугольники и т. д.), так и сложными, составленными из нескольких простых. Кроме того, имеется большая библиотека готовых к применению

графических объектов, охватывающих практически все отрасли промышленного производства. Также к средствам визуализации можно отнести средства представления технологических параметров в виде графиков во времени (тренды) и средств формирования тревог (алармы).

Средства хранения информации обеспечивают взаимодействие SCADA-систем с системами управления базами данных (СУБД), которые могут быть реализованы как с использованием только средств SCADA-систем, так и быть внешними (например, Microsoft Access, Oracle и др.).

Все системы SCADA относятся к открытым системам, т. е. к системам, которые могут взаимодействовать с другими открытыми системами для обмена данными с помощью стандартных методов, например с использованием протокола DDE (dynamic data exchange) или технологии OPC (Object Linking and Embedding for Process Control). Такое взаимодействие позволяет создавать интегрированные системы из микропроцессорных средств и программного обеспечения различных производителей, но при этом объединение их в одну систему производится стандартными методами, через открытые интерфейсы каждой подсистемы.

Встроенный язык программирования *scripts* предоставляет потребителю гибкий инструмент для разработки сложных приложений, требующих проведения вычислительных операций по реализации поведения графических объектов, выполнения математических и статистических расчетов, формирования логики управления технологическими объектами.

В промышленности широко распространены такие SCADA-системы, как WinCC (Siemens), InTouch HMI (Wonderware), Trace Mode (AdAstra).

Любая SCADA-система представляет собой комплекс программных средств, взаимодействующих друг с другом. К основным графическим средствам SCADA-систем относят:

- проводник или менеджер приложений, входящие в состав системы и предназначенные для оперативного управления проектом;
- среду разработки окна приложения, включающую в себя графические примитивы, средства связывания графических элементов с сигналами АСУ ТП, средства анимации и т. д.;
- средства контроля, диагностики и хранения информации;
- среду исполнения.

Передача информации с уровня контроллеров (локальных контуров управления) на уровень диспетчеризации процесса про-

изводится через специализированные устройства — шлюзы или коммуникационные процессоры, которые входят в состав комплекса технических средств МПК.

Передача данных осуществляется с использованием стандартизированной в АСУ ТП технологии OPC. Для организации связи необходимо настроить на компьютере АРМ оператора специализированную программу — OPC-сервер, которая реализует обмен информацией с МПК. Для каждого типа МПК производитель выпускает свой OPC-сервер, в котором осуществляется протокол обмена с конкретным типом контроллера. Для контроллеров семейства SIMATIC протокол обмена реализуется с помощью специализированного ПО Simatic NET, которое содержит как сам OPC-сервер, так и средства его настройки.

Для SCADA-системы, реализованной в среде Windows, OPC-сервер предоставляет данные по протоколу внутренней передачи данных между приложениями DDE. Для преобразования протоколов используются дополнительные программные модули (например, OPCLink). Упрощенная схема реализации механизма передачи данных между МПК и АРМ оператора представлена на рис. 4.6.

Средства связи SIMATIC NET — это специализированные драйверы для организации связи между контроллерами фирмы Siemens и PC. Различают два вида драйверов — SOFTNET PG и SOFTNET S7. Драйвер SOFTNET PG можно использовать только для програм-

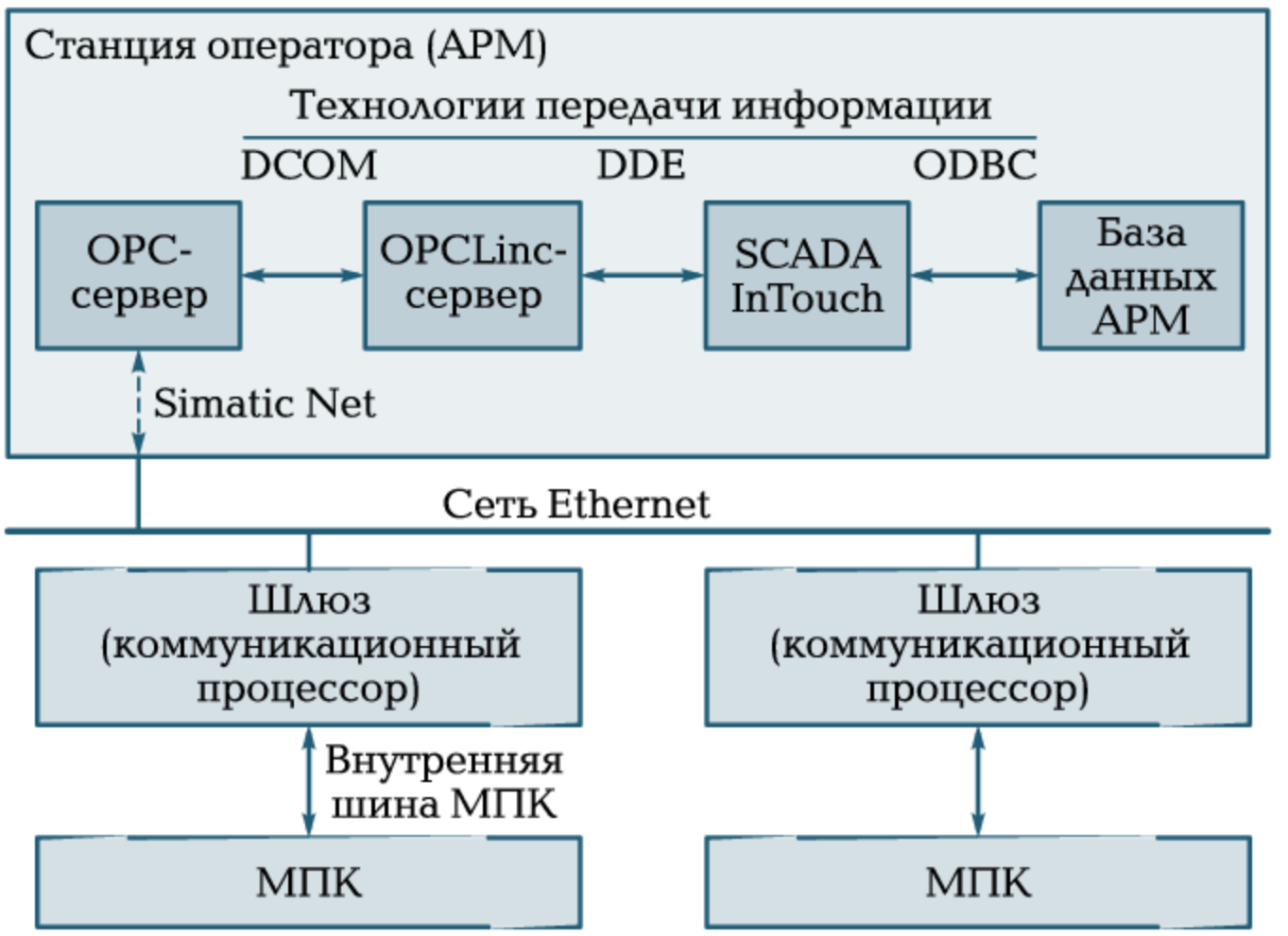


Рис. 4.6. Схема реализации механизма передачи данных между МПК и АРМ оператора с использованием SCADA-системы InTouch

мирования и диагностики состояния станции (контроллера) через Simatic Manager; драйвер SOFTNET S7 предоставляет возможность получения и передачи данных в контроллер через входящий в состав OPC-сервер.

Специальное программное обеспечение OPCLink Server фирмы Wonderware позволяет SCADA-системе InTouch получать доступ к данным OPC-сервера. SCADA-система InTouch взаимодействует с OPCLink Server через DDE (dynamic data exchange) — аппарат динамического обмена данными между различными приложениями на основе механизма сообщений операционных систем Windows. В SCADA-системах реализована технология ODBC — набор функций API (Application Interface — интерфейс-приложения) — технология доступа к реляционным базам данных.

Сигналы от датчиков технологического процесса считываются контроллером PLC и используются в системе управления. Контроллер для каждого локального контура в соответствии с заданным алгоритмом управления формирует управляющий сигнал. Одновременно эти сигналы поступают и в SCADA-систему для контроля оператором. На основе этой информации происходит представление объекта на мнемосхеме. Оператор имеет возможность вмешиваться в процесс управления путем изменения задания, переключения режима управления, формирования сигналов управления вручную. Эти команды оператор может подавать как через интерфейс АРМ, так и локально, используя технические средства контура (ручной задатчик, блок ручного управления).

ЧАСТЬ II

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ НЕСЛОЖНЫХ МОДУЛЕЙ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Глава 5. Принципы построения и аппаратное обеспечение микропроцессорных управляющих систем

Глава 6. Технические средства автоматизации

Глава 7. Моделирование объектов и систем управления

Глава 5

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

5.1. СТРУКТУРА ТИПИЧНОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Общие сведения. Современные мехатронные системы промышленного производства представляют собой интегрированный комплекс технических средств с микропроцессорной системой управления.

Архитектура типичной микропроцессорной системы показана на рис. 5.1. Такая система содержит все пять основных блоков цифровой машины: устройство ввода информации; микропроцессор, включающий управляющее устройство (УУ) и арифметико-логическое устройство (АЛУ); запоминающие устройства — постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) и внешнее запоминающее устройство (ВЗУ); устройство вывода информации.

Шина адреса (ША) служит для определения адреса (номера) устройства, с которым процессор обменивается информацией в данный момент. Каждому устройству (кроме процессора), каждой ячейке памяти в микропроцессорной системе присваивается собственный адрес. Когда код какого-то адреса выставляется процессором на шине адреса, устройство, которому этот адрес приписан, понимает, что ему предстоит обмен информацией. Шина адреса может быть одно- и двунаправленной.

Шина данных (ШД) — основная шина, используемая для передачи информационных кодов между всеми устройствами микропроцессорной системы. Обычно в пересылке информации участвует процессор, который передает (принимает) код данных в какое-то устройство или ячейку памяти (из устройства или ячейки памяти). Возможна и передача информации между устройствами без участия процессора. Шина данных всегда двунаправленная.

Шина управления (ШУ) в отличие от ША и ШД состоит из отдельных управляющих сигналов. Каждый из этих сигналов во время обмена информацией выполняет свою функцию. Некоторые управляющие сигналы служат для стробирования передаваемых или принимаемых данных, т. е. определяют моменты времени, когда информационный код выставлен на шину данных. Другие управляющие сигналы могут использоваться для подтверждения приема данных, для сброса всех устройств в исходное состояние и т. д. Линии шины управления могут быть одно- или двунаправленными.

Постоянное запоминающее устройство в микропроцессорной системе содержит некоторую программу управления всеми элементами системы.

Программы могут быть загружены в запоминающее устройство с произвольной выборкой (ЗУПВ) и из внешнего запоминающего устройства. Это программы управления, составленные пользователями.

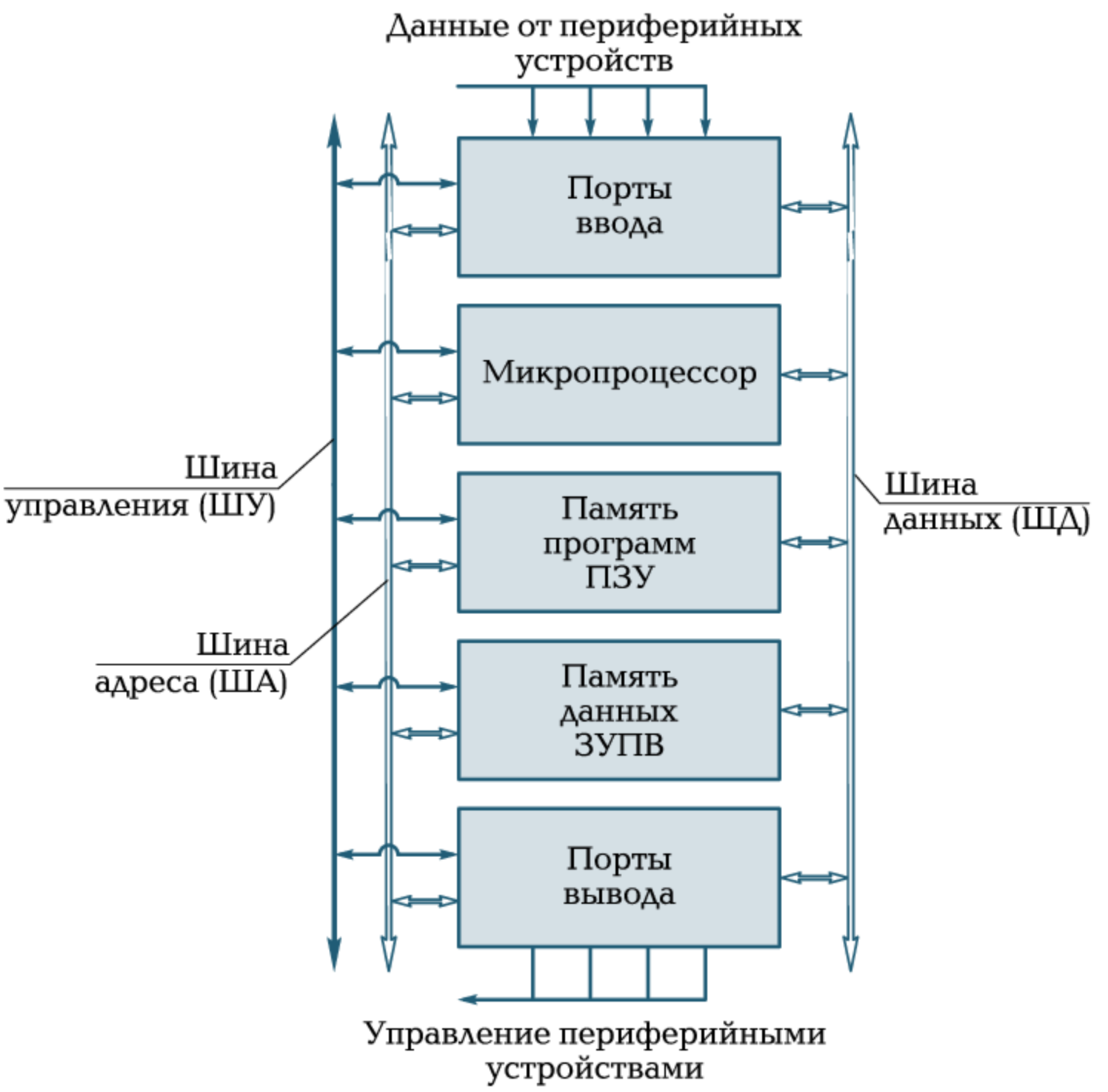


Рис. 5.1. Структура типичной микропроцессорной системы

Характеристики, функциональная организация и алгоритм работы микропроцессора. Микропроцессор состоит из устройства управления, арифметико-логического устройства и связанных с ним регистров (рис. 5.2). Регистр представляет собой внутреннюю быстродействующую память процессора.

Устройство управления, используя регистры, управляет обменом информацией между памятью, портом ввода-вывода и арифметико-логическим устройством, а также выполнением операций в АЛУ.

Процесс выполнения операции в АЛУ сводится к определенной последовательности открытия и закрытия вентильных схем по алгоритму, определенному текущей выполняемой командой. Алгоритм выполнения каждой команды хранится в устройстве управления микропроцессора в виде последовательности микрокоманд. Простейшая микрокоманда представляет собой набор битов, каждый из которых управляет определенной вентильной схемой. Если в бите хранится логическая «1», то это означает, что соответствующую схему необходимо открыть; если «0», то закрыть.

Преобразование команды программы в последовательность микрокоманд называется *дешифрацией*. Таким образом, работа микропроцессора представляет собой последовательную реализацию микропроцедур выборки-дешифрации-исполнения. Однако фактическая последовательность операций в микропроцессорной системе управления определяется командами, записанными в памяти программ (ПЗУ).

Все команды, выполняемые процессором, образуют *систему команд* процессора. Структура и объем системы команд процессора определяют его быстродействие, гибкость, удобство использования. Всего команд у процессора может быть от нескольких десятков до нескольких сотен. Система команд рассчитана либо на узкий круг решаемых задач (специализированные процессоры), либо на мак-

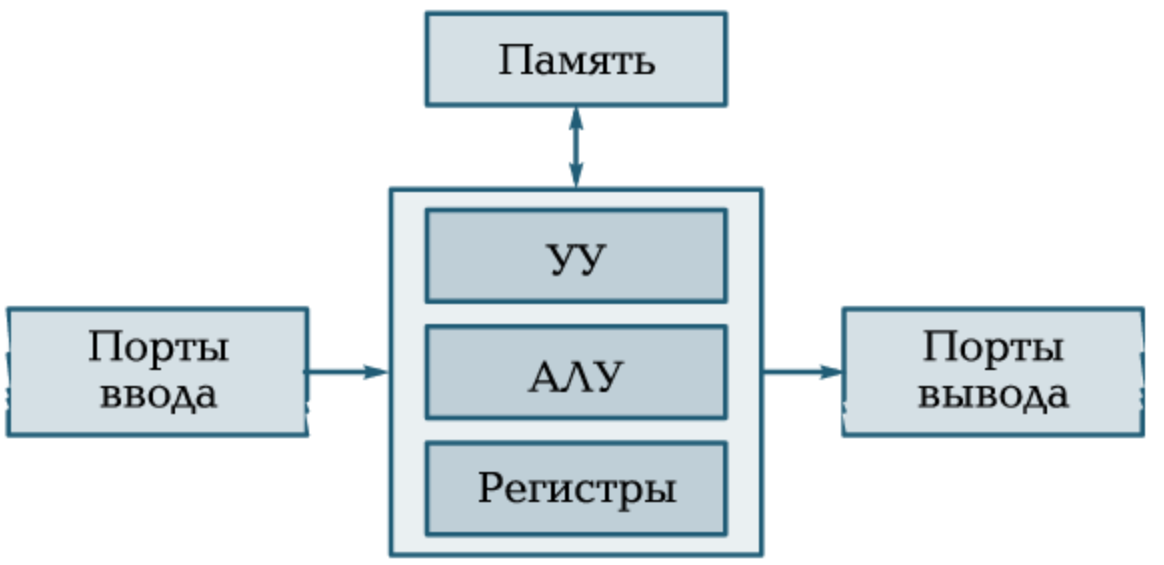


Рис. 5.2. Функциональная структура микропроцессора

симально широкий круг задач (универсальные процессоры). Коды команд могут иметь различное количество разрядов (занимать от одного до нескольких байт). Каждая команда имеет свое время выполнения, поэтому время выполнения всей программы зависит не только от количества команд в программе, но и от используемых команд.

Алгоритм работы микропроцессора можно представить следующей, циклически повторяющейся, последовательностью:

- выборка команды программы из основной памяти;
- дешифрация команды;
- выполнение арифметических, логических и других операций, закодированных в команде;
- пересылка информации между регистрами и основной памятью или между регистрами и устройствами ввода/вывода.

Основными характеристиками микропроцессора в цифровой системе управления являются:

- *тактовая частота* — максимальное время выполнения переключения элементов;
- *разрядность* — максимальное число одновременно обрабатываемых двоичных разрядов. Разрядность микропроцессора обозначается так: $m/n/k$ (m — разрядность внутренних регистров, определяющая принадлежность к тому или иному классу процессоров; n — разрядность шины данных, характеризующая скорость передачи информации; k — разрядность шины адреса, т. е. размер адресного пространства). Например, разрядность микропроцессора i8088: $m/n/k = 16/8/20$;
- *архитектура* — система команд и способов адресации, возможность совмещения выполнения команд во времени, наличие дополнительных устройств в составе микропроцессора, принципы и режимы его работы. Выделяют понятия микро- и макроархитектуры.

5.2. СПОСОБЫ ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ В МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЕ

В микропроцессорной системе применяют три режима ввода/вывода (ВВ) информации:

- программно-управляемый ВВ (называемый также программным или неформированным ВВ);
- обмен по прерываниям (форсированный ВВ);
- прямой доступ к памяти.

Действия, выполняемые на системной магистрали микропроцессорной системы, подчиняются двум основным принципам:

- принцип «управляющий» — «управляемый» (master — slave): в процессе взаимодействия любых двух устройств одно из них обязательно выполняет активную, управляющую, роль и служит задатчиком, другое оказывается управляемым, исполнителем. Задатчиком обычно является процессор;
- принцип квитирования (запрос — ответ): каждый управляющий сигнал, посланный задатчиком, подтверждается сигналом исполнителя. При отсутствии ответного сигнала исполнителя в течение заданного интервала времени формируется так называемый тайм-аут, задатчик фиксирует ошибку обмена и прекращает данную операцию.

Программно-управляемый ввод/вывод характеризуется тем, что инициирование и управление ВВ осуществляется программой, выполняемой процессором, а внешние устройства играют пассивную роль и сигнализируют только о своем состоянии, в частности о готовности к операциям ввода/вывода, например индикатор на светодиодах. При необходимости ВВ в соответствующем месте программы используются команды ввода/вывода информации через порт (IN/OUT). Такую передачу данных называют синхронным, или безусловным, ВВ.

Однако для большинства внешних устройств до выполнения операций ВВ необходимо убедиться в их готовности к обмену, т. е. ВВ является асинхронным. Общее состояние устройства характеризуется флагом готовности READY, называемым также флагом готовности/занятости (READY/BUSY). Иногда состояния готовности и занятости идентифицируются отдельными флагами READY и BUSY, входящими в слово состояния устройства.

Процессор проверяет флаг готовности с помощью одной или нескольких команд. Если флаг установлен, то инициируются собственно ввод или вывод одного или нескольких слов данных. Когда флаг сброшен, процессор выполняет цикл из двух-трех команд с повторной проверкой флага READY до тех пор, пока устройство не будет готово к операциям ВВ. Данный цикл называют циклом ожидания (готовности) внешнего устройства. После готовности устройства производится обмен данными с ним. Данные передаются алгоритмам обработки или другим алгоритмам обмена, после чего цикл повторяется.

Основной недостаток программного ВВ связан с непроизводительными потерями времени процессора в циклах ожидания. К достоинствам следует отнести простоту его реализации, не требующей дополнительных аппаратных средств.

Обмен по прерываниям используется в случае, когда необходима реакция микропроцессорной системы на какое-то внешнее событие, на приход внешнего сигнала. Реагируя на этот сигнал готовности устройства к передаче данных, процессор передает управление подпрограмме обслуживания устройства, вызвавшего прерывание. Действия, выполняемые этой подпрограммой, определяются пользователем, а непосредственными операциями ВВ управляет процессор. В случае управляющей микропроцессорной системы внешним событием может быть, например, срабатывание концевого выключателя или приход по информационной сети пакета данных. Микропроцессорная система должна реагировать на это соответственно формированием новой управляющей команды или чтением и обработкой принятого по сети пакета.

До тех пор пока событие не произошло, процессор может выполнять другие задачи, не связанные с конкретным устройством ввода/вывода, что позволяет избежать потерь времени на ожидание действия.

Прямой доступ к памяти **(ПДП, DMA)** — это режим, принципиально отличающийся от двух ранее рассмотренных режимов тем, что обмен по системной шине идет без участия процессора, т. е. передача данных осуществляется напрямую между основной памятью и быстродействующим внешним устройством. Внешнее устройство, требующее обслуживания, сигнализирует процессору, что режим ПДП необходим, в ответ на это процессор заканчивает выполнение текущей команды и отключается от всех шин, сигнализируя запросившему устройству, что обмен в режиме ПДП можно начинать.

Операция ПДП сводится к пересылке информации из устройства ввода/вывода в память или из памяти в устройство ввода/вывода. Когда пересылка информации будет закончена, процессор вновь возвращается к прерванной программе, продолжая ее с той точки, где его прервали. Это похоже на режим обслуживания прерываний, но в данном случае процессор не участвует в обмене.

Понятно, что в этом случае требуется введение в систему дополнительного устройства (контроллера ПДП), которое будет осуществлять полноценный обмен по системной магистрали без участия процессора. Причем процессор предварительно должен сообщить этому контроллеру ПДП, откуда ему следует брать информацию и/или куда ее следует помещать. Контроллер ПДП может считаться специализированным процессором, который отличается тем, что сам не участвует в обмене, не принимает информацию и не выдает ее.

Обмен в режиме ПДП может проходить со скоростью, ограниченной только пропускной способностью шины данных, что делает этот режим единственным для обмена данными с внешними устройствами, быстродействие которых сопоставимо с быстродействием процессора.

5.3. ПОНЯТИЕ ОБ ИНТЕРФЕЙСЕ СВЯЗИ. ТИПЫ ИНТЕРФЕЙСОВ

В общем случае под интерфейсом связи понимают программы и аппаратуру, обеспечивающие связь между собой двух и более объектов. В состав технических средств интерфейса входят электрические линии связи и специальные электронные схемы, имеющиеся в каждом объекте и управляющие передачей и приемом сигналов по линии связи в соответствии с протоколом обмена.

Существует несколько основных типов интерфейсов обмена: магистральный, радиальный, кольцевой, комбинированный (рис. 5.3).

Магистральный интерфейс характеризуется тем, что все устройства управляющего микропроцессорного комплекса подключаются к общей унифицированной шине связи, и является самым распространенным из микропроцессорных устройств. Структурная схема микропроцессорной системы с магистральным интерфейсом представлена на рис. 5.3, *а*.

Магистральный интерфейс позволяет иметь общий протокол обмена и одинаковую аппаратуру сопряжения с общей шиной. Обмен ведется по типу «активное устройство — пассивное устройство». Пассивное устройство может быть только исполнителем, прием и передачу данных оно может вести только под управлением активного устройства.

В магистральных интерфейсах обычно применяют общее адресное пространство для оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) и регистров контроллеров внешних устройств (ВУ). Магистральная шина разделяется на ША — для передачи адреса выбранного элемента системы (порта или ячейки памяти), ШД — для передачи данных и ШУ — для передачи команд управления устройствами. В некоторых случаях для сокращения количества проводников применяют мультиплексирование шины адреса и шины данных — данные и адреса передаются по одним и тем же проводникам, но в разные промежутки времени.

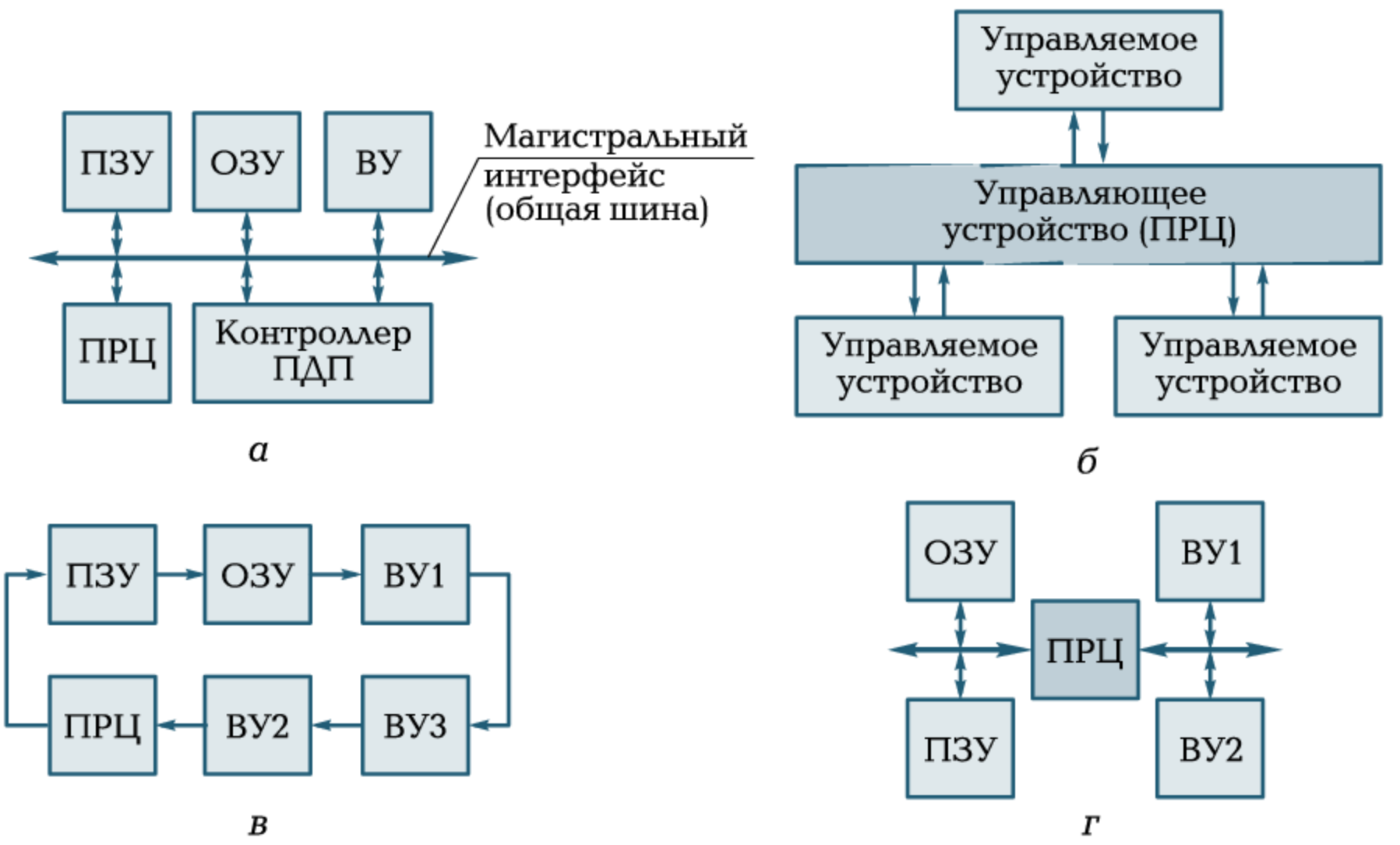


Рис. 5.3. Типы интерфейсов микропроцессорных систем:

а — магистральный; *б* — радиальный; *в* — кольцевой; *г* — комбинированный

Обмен информацией в каждый момент времени может происходить только между двумя устройствами — активным и пассивным. Активное устройство всегда является инициатором обмена — формирует сигнал выбора пассивного устройства, оценивает готовность к обмену пассивного устройства, производит обмен данными с выбранным пассивным устройством. Устройства, не участвующие в обмене, отключаются от магистрального интерфейса. Активным устройством чаще всего выступает процессор системы (ПРЦ). Однако в некоторых случаях для непосредственного обмена данными между внешним устройством и памятью — активным устройством — выступает контроллер ПДП.

Магистральный интерфейс обычно проектируется асинхронным, т. е. скорость обмена данными зависит от быстродействия самого медленного участника обмена и длины линии связи.

Основными достоинствами магистрального интерфейса является его универсальность и относительно низкая стоимость реализации. К недостаткам относятся большое количество проводников и наличие циклов ожидания (очереди) для устройств, готовых к обмену.

Радиальный интерфейс имеет один управляющий модуль, к которому по радиальной схеме подключаются управляемые модули (рис. 5.3, *б*).

При использовании радиального интерфейса управляемые модули непосредственно обмениваться информацией между собой не могут. Такой обмен возможен только через управляющий модуль.

В радиальном интерфейсе обычно применяют однонаправленные подшины для передачи данных, т. е. сигналы от управляющего модуля передаются по одной части шины, а сигналы от управляемого модуля — по другой части однонаправленной шины. Адресная шина данных здесь обычно не используется.

Основным достоинством радиального интерфейса является возможность одновременного обмена данными между несколькими управляемыми модулями. Недостатки состоят в сложности реализации при большом количестве управляемых устройств и высокой стоимости.

Кольцевой интерфейс обеспечивает последовательную передачу информации между всеми элементами микропроцессорной системы (рис. 5.3, *в*).

Обмен данными может производиться одновременно всеми устройствами, входящими в систему. Каждое устройство формирует свой пакет информации, присваивает ему адрес источника и приемника и добавляет сформированный пакет в общий поток информации.

После приема пакета очередным устройством проверяется «требуемость» пакета данных. В случае отрицательного ответа весь пакет данных без изменений передается следующему устройству. Если данные необходимы, то производится их копирование, в пакет добавляется информация о том, что данные были востребованы устройством, после чего пакет поступает к следующему устройству.

После того как пакет совершит полный круг и поступит к устройству, сформировавшему его, он изымается из потока и формируется новый пакет, который вновь добавляют к общему потоку информации.

По шине кольцевого интерфейса могут передаваться адреса, данные и команды управления устройствами системы, что резко снижает количество проводников шины. Кроме того, в последнее время появились системы с кольцевым интерфейсом, в котором реализован последовательный принцип передачи отдельных слов цифровой информации, что позволило сократить количество проводников шины до трех-четырех.

Одним из существенных достоинств данного интерфейса является возможность построения распределенной вычислительной системы с ограниченным количеством линий связи, что существенно

упрощает «сборку» такой системы на месте. Основной недостаток состоит в необходимости иметь в каждом модуле такой системы, кроме основных функциональных элементов, приемник и передатчик цифровых данных.

Комбинированный интерфейс в последнее время вытесняет магистральный по распространенности и объединяет в себе положительные качества магистрального и радиального интерфейсов. Обычно комбинированный интерфейс содержит две общие шины, подключенные к управляющему процессору радиально (рис. 5.3, *г*). В этом случае «быстрые» устройства подключаются в одну шину, «медленные» — в другую. Это позволяет избежать больших потерь времени при доступе, в основном, к памяти со стороны процессора. На время доступа не будет влиять время ожидания готовности периферийных устройств.

5.4. ТИПЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Общие сведения. Для хранения информации в микропроцессорных системах используются запоминающие устройства на основе полупроводниковых материалов, а также магнитные и оптические внешние носители. Внутренняя память компьютера представлена в виде отдельных интегральных микросхем (ИМС) собственно памяти и элементов, включенных в состав других ИМС, не выполняющих непосредственно функцию хранения программ и данных, — это и внутренняя память центрального процессора, и видеопамять, и контроллеры различных устройств.

Для создания элементов запоминающих устройств применяют в основном интегральные схемы со структурой МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) на основе кремния (поскольку в качестве диэлектрика чаще всего используют оксид кремния SiO_2, их обычно называют МОП (металл-оксид-полупроводник)-структурами).

Для функционирования микропроцессорной системы необходимо наличие как ОЗУ, так и ПЗУ, обеспечивающего сохранение информации при выключении питания (ОЗУ могут быть статическими и динамическими, а ПЗУ — одно- или многократно программируемыми).

Характеристики запоминающих устройств. Полупроводниковая память характеризуется большим количеством параметров, которые необходимо учитывать при проектировании систем:

- ***объем памяти*** — число бит хранимой информации. Объем кристалла обычно также выражается в битах и составляет 1 024 бита, 4 кбит, 16 кбит, 64 кбит и т. п. Важной характеристикой кристалла является информационная организация кристалла памяти $M \times N$, где M — число слов; N — разрядность слова. Например, кристалл объемом 16 кбит может иметь различную организацию: 16K×1, 4K×2, 1K×8. При одинаковом времени обращения память с большей шириной выборки обладает большей информационной емкостью;
- ***время доступа*** — временной интервал, определяемый от момента, когда центральный процессор выставил на шину адрес требуемой ячейки памяти и послал по шине управления приказ на чтение или запись данных, до момента осуществления связи адресуемой ячейки с шиной данных;
- ***время записи*** — время, необходимое для записи содержимого шины данных в ячейку памяти. Время записи определяется физическими свойствами. При изготовлении памяти в нее встраивают специальную схему, которая формирует импульс записи нужной длительности. Команда на выработку этого импульса формируется в конце времени доступа. По окончании импульса записи память информирует процессор об окончании процедуры «запись» посылкой сигнала «готово» по шине управления;
- ***время восстановления*** — время, необходимое для приведения элементов памяти в исходное состояние после того, как процессор снял сигнал адреса с ША и сигнал «чтение» или «запись» с ШУ;
- ***цикл считывания или записи*** — промежуток времени выдачи процессором адреса требуемой ячейки и сигнала «чтение» или «запись» до момента завершения всех действий по выполнению этой операции.

Типы запоминающих устройств. Классификацию запоминающих устройств проводят по следующим основаниям:

- ***возможности изменения информации*** — ОЗУ и ПЗУ. Запоминающие элементы, которые относительно легко меняют свое состояние, используются для построения памяти с произвольным доступом — ОЗУ. Из элементов, в которые только один раз можно записать «0» или «1», конструируются ПЗУ (одним из вариантов ПЗУ являются стираемые перепрограммируемые ПЗУ (СППЗУ));
- ***способу выборки информации*** — произвольный и последовательный способы выборки из запоминающего устройства. В первом случае время доступа к словам не зависит от их размещения, во втором — зависит. Запоминающие устройства с произволь-

ной выборкой разделяют на статические и динамические ОЗУ. Запоминающие устройства с последовательной выборкой — на регистры сдвига и приборы с зарядовой связью (ПЗС);

- ***возможности сохранения информации при отключении питания*** — энергонезависимые и энергозависимые;
- ***способу адресации ячеек запоминающего устройства*** — одно- и двумерные. Схема *одномерной адресации* запоминающих элементов (ЗЭ) организует адресацию к 256 строкам по восемь запоминающих элементов в каждой строке и обозначается 256×8 (рис. 5.4, *а*).

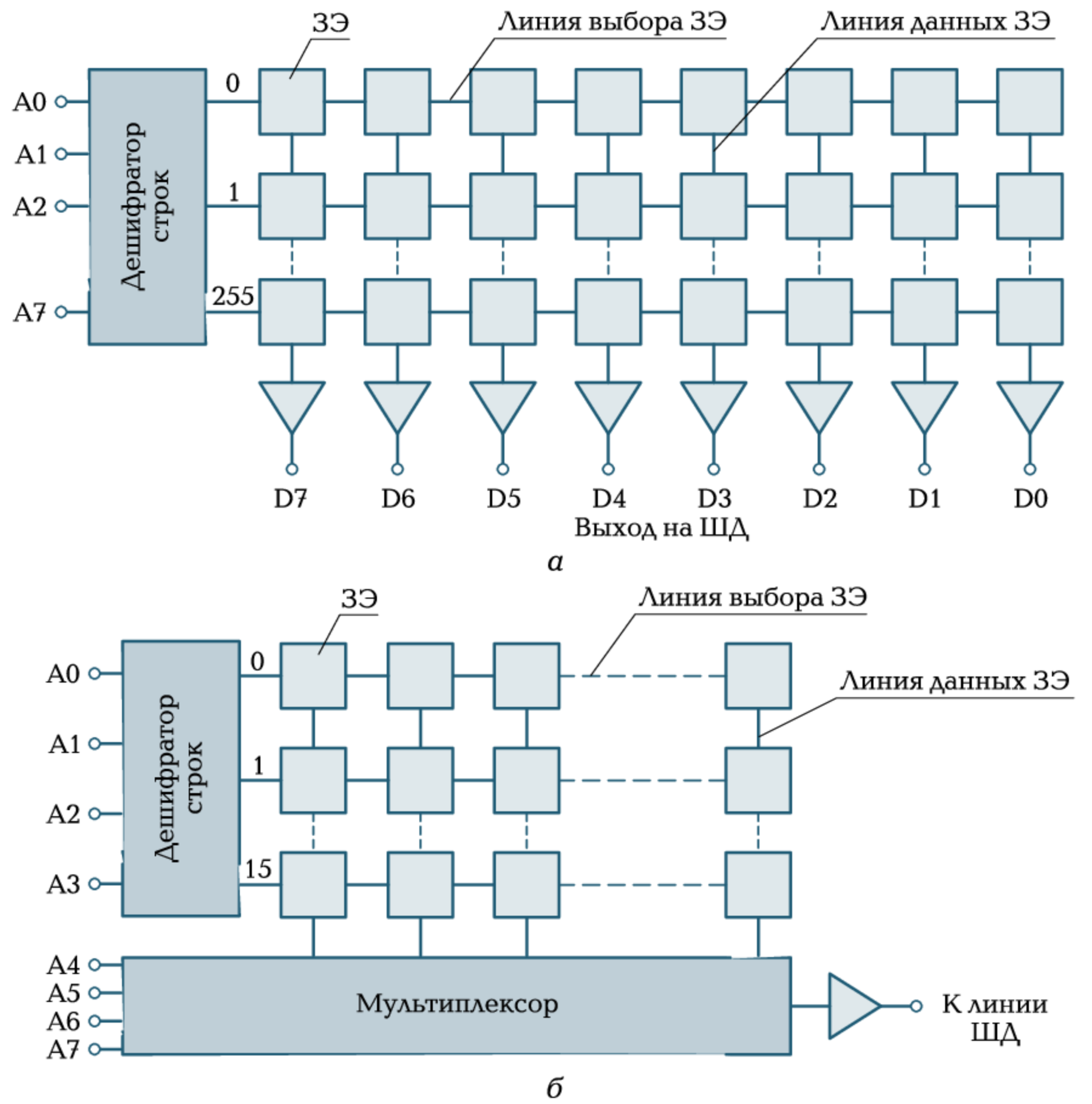


Рис. 5.4. Схемы адресации к запоминающим элементам (ЗЭ):

а — одномерная; *б* — двумерная

При поступлении сигнала адреса по ША на дешифратор строк на одном из выходов дешифратора формируется логический сигнал. Этот сигнал поступает одновременно на входы «Выбор ЗЭ» всех запоминающих элементов строки. В результате содержимое строки памяти появляется на линиях данных и подается на входы усилителя считывания, выходы которого подключены к шине данных.

Необходимость увеличения объема памяти приводит к увеличению числа выходов дешифратора строк и усложнению функциональной организации дешифратора. Поэтому для запоминающих устройств большого объема применяется способ двумерной адресации запоминающих элементов.

Принцип организации *двумерной адресации* поясним структурной схемой (рис. 5.4, *б*). Данная память содержит 256 запоминающих элементов и обозначается 256×1. Дешифратор строк имеет 16 выходов. На вход дешифратора строк поступают сигналы только половины адресных линий. При появлении на одном из выходов дешифратора строк логической единицы этот сигнал поступает на вход «Выбор ЗЭ» каждого запоминающего элемента всей строки. В результате на вертикальных линиях (столбцах) появляется содержимое этой строки.

Мультиплексор подключает усилитель считывания только к одному из 16 столбцов. Номер столбца определяется сигналами второй половины адресных линий.

Для организации полноценного запоминающего устройства, способного сохранять слово информации, используется несколько двумерных схем, каждая из которых формирует строго определенный разряд слова. Адресные линии всех схем объединяются, а каждый выход схемы подключается к своему проводнику шины данных. Структура организации запоминающего устройства, построенного на элементах с двумерным способом адресации, показана на рис. 5.5;

- ***временно́му характеру измеряемой величины*** — статические и динамические ОЗУ. Ячейка *статического* запоминающего элемента представляет собой триггер, построенный на шести МОП-транзисторах с обязательным использованием для работы ячейки внешнего источника питания. Электрическая схема ячейки приведена на рис. 5.6, *а*. Здесь VT3 и VT4 играют роль нагрузочных резисторов, а VT5 и VT6 — электрических ключей. Соединенные крест-накрест транзисторы VT1 и VT2 всегда находятся в противоположных состояниях — когда один транзистор открыт, то с него подается запирающий потенциал

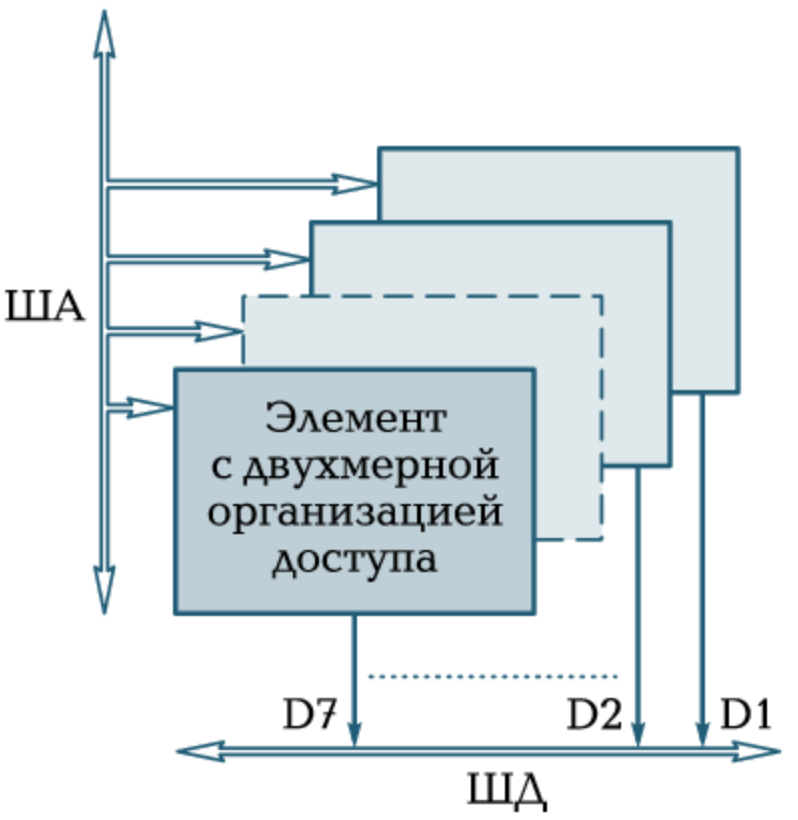


Рис. 5.5. Структура организации запоминающего устройства с двумерной организацией доступа

на другой транзистор. В свою очередь, с закрытого транзистора снимается потенциал, поддерживающий проводящее состояние открытого транзистора. В этом состоянии триггер будет находиться до тех пор, пока по линии «Выбор ЗЭ» не поступит сигнал логической единицы, переводящий электронные ключи VT5 и VT6 в проводящее состояние и одновременно с этим по линии «Чтение»—«Запись» (W/R), отпирающая единица или закрывающий ноль. В этом случае триггер переходит в противоположное состояние.

Большой размер запоминающего элемента ограничивает создание модулей памяти большой емкости. Однако, имея очень малое

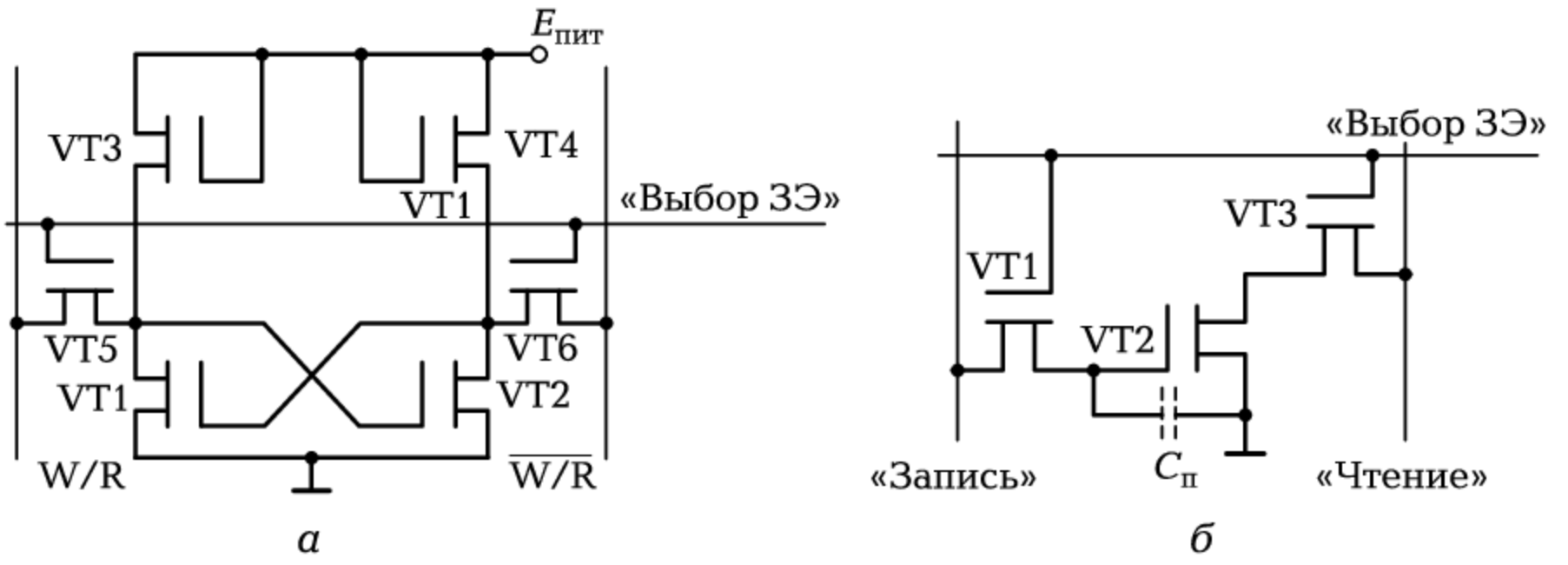


Рис. 5.6. Электрическая схема ячейки ОЗУ:

а — статического типа; *б* — динамического типа

время доступа и постоянную готовность к записи и чтению информации, статические ОЗУ нашли широкое применение в качестве промежуточной памяти между процессором и основным ОЗУ для хранения наиболее часто используемой информации (так называемая кэш-память).

Электрическая схема *динамического* запоминающего элемента на трех МОП-транзисторах, показана на рис. 5.6, *б*. Здесь информация хранится на паразитной емкости $C_п$, которая всегда существует между электродами транзистора. Если заряд емкости $C_п$ превышает определенное пороговое значение, то транзистор VT2 находится в проводящем состоянии. В противном случае транзистор VT2 закрыт. Транзисторы VT1 и VT3 выполняют роль ключей при подключении линий «Запись» и «Чтение».

Открытое состояние транзистора не является самоподдерживающимся, поскольку емкость разряжается током утечки. Следовательно, необходимо периодически подзаряжать емкость $C_п$.

Подзарядка емкости $C_п$ выполняется следующим образом. Линии «Чтение» и «Запись» через формирователь (усилитель) объединяются, а по линии «Выбор ЗЭ» периодически подаются сигналы, переводящие транзисторы VT1 и VT3 в проводящее состояние. В результате этого на линии «Чтение» будет появляться содержимое данного запоминающего элемента, которое через формирователь подается на линию «Запись» этого же запоминающего элемента, т. е. выполняется перезапись содержимого запоминающего элемента. Такой процесс называют *регенерацией*. Регенерацию требуется проводить каждые 1 ... 2 мс. Для этого модули памяти снабжают специальными схемами.

Во время регенерации память не доступна процессору, поэтому исполнение команд обращения к памяти процессора задерживается. Если это нежелательно, то память снабжается дополнительными блоками, прерывающими процесс регенерации на время обработки запроса процессора. Все эти элементы усложняют схему управления памятью.

Сложность схемы управления запоминающими элементами и наличие задержек при обращении к памяти процессора являются основными недостатками динамической памяти.

Достоинство состоит в небольшом размере ячейки запоминающего элемента и, как следствие, возможности создания модулей памяти большой емкости.

В настоящее время оперативные запоминающие устройства, построенные на модулях динамической памяти, — самый распространенный тип ОЗУ в микропроцессорных системах.

Постоянные запоминающие устройства подразделяют на ПЗУ с масочным программированием, программируемые ПЗУ и стираемые программируемые ПЗУ.

В ПЗУ с масочным программированием (рис. 5.7) информация записывается раз и навсегда в процессе их изготовления. Запись заключается в металлизации промежутков, соединяющих через МОП-транзисторы или диоды соответствующие линии строк и столбцов. Для этого применяют фотошаблоны. Дешифратор строк в зависимости от сигнала адреса выдает сигнал логической «1» на соответствующую строку. Если какому-либо разряду соответствует металлизированный промежуток, то «1» появится на его линии считывания. Если промежуток не металлизированный, то считываться будет «0».

В программируемых ПЗУ линии строк и столбцов памяти соединяют диодами с плавкими предохранителями, т. е. при изготовлении во все запоминающие элементы записывается «1». Программирование таких запоминающих устройств заключается в том, что с помощью коротких импульсов тока в соответствующих местах плавкие предохранители разрушаются.

В стираемых программируемых ПЗУ линии строк и столбцов соединяются с помощью МОП-транзисторов с плавающим затвором. В исходном состоянии МОП-транзисторы имеют большое сопротивление, т. е. закрыты. При изготовлении такой памяти во все запоминающие элементы сначала записывается «0». Подачей импульсов большой амплитуды соответствующие МОП-транзисторы переводятся в проводящее состояние, в котором транзисторы могут находиться в течение длительного времени (≈10 лет).

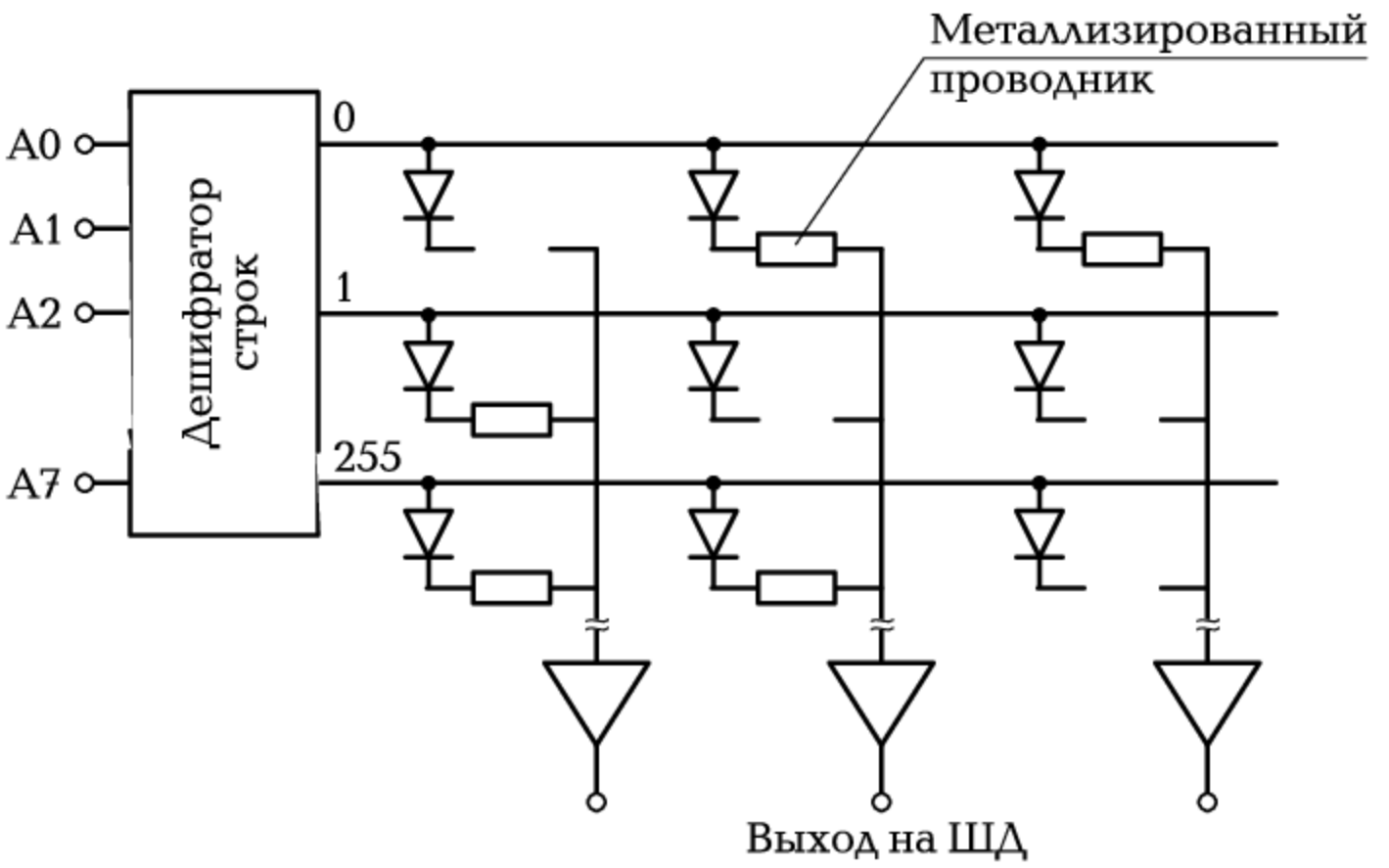


Рис. 5.7. Структурная схема ПЗУ с масочным программированием

Плавающий затвор представляет собой область поликремния, окруженную диэлектриком (обычно оксидом кремния), т. е. он электрически не связан с другими электродами и его потенциал «плавает». Обычно толщина нижнего диэлектрического слоя составляет десятки ангстрем (1 Å = 10^{-10} м). Это позволяет в сильном электрическом поле инжектировать электроны в плавающий затвор.

Программирование таких запоминающих элементов заключается в том, что подачей импульсов напряжения большой амплитуды между стоком и истоком вызывают электрический пробой стокового (p—n)-перехода. Физические процессы при этом таковы, что плавающий затвор заряжается отрицательно из-за инжекции электронов.

Отрицательно заряженный плавающий затвор вытесняет из приграничной области электроны, в результате чего в этой области освобождается путь для дырок, т. е. индуцируется проводящий канал p-типа. Сопротивление транзистора резко падает, следовательно, в данном запоминающем элементе будет записана «1». Поскольку плавающий затвор изолирован со всех сторон, его отрицательный заряд будет сохраняться в течение длительного времени, и транзистор будет находиться в проводящем состоянии.

Перевод транзистора в закрытое состояние, т. е. удаление отрицательного заряда, осуществляется либо ультрафиолетовым излучением через кварцевое окно, либо подачей на МОП-структуру транзистора импульса напряжения, противоположного по знаку записывающему.

5.5. ПОНЯТИЕ О КОНТРОЛЛЕРАХ ВНЕШНИХ УСТРОЙСТВ

К процессору подключаются различные внешние устройства. Это датчики, исполнительные устройства, устройства для долговременного хранения информации и т. д. Многие из этих устройств разрабатывались вне какой-либо взаимосвязи с конкретным типом микропроцессорной системы или процессора. Каждое из устройств характеризуется такими свойствами, как быстродействие, набор управляющих сигналов, форма представления данных и другими, т. е. интерфейс внешнего устройства, как правило, не совместим с интерфейсом процессора или микропроцессорной системы в целом. Поэтому для организации подключения внешнего устройства к микропроцессорной системе используются контроллеры внешних устройств.

В микропроцессорной системе принято называть *внешними устройствами* такие элементы, которые не имеют непосредственного контакта с процессором, а подключаются к нему через дополнительные промежуточные преобразователи — контроллеры внешних устройств. Они согласуют уровни электрических сигналов, а также преобразуют машинные данные в необходимый формат, и наоборот. Обычно контроллеры внешних устройств конструктивно оформляются вместе с процессором в виде интерфейсных плат.

В последнее время, в связи с полной унификацией интерфейсов микропроцессорных систем, многие производители начали выпуск внешних устройств со встроенным контроллером этого устройства, что позволяет использовать их как в качестве отдельного компонента системы управления, выполняющего классические функции, так и непосредственно подключать устройство по одному из стандартных интерфейсов к микропроцессорной системе без каких-либо дополнительных устройств.

В процессе ввода/вывода информации между процессором и контролером внешнего устройства передается информация двух видов: управляющие данные (слова) и собственно данные, или данные-сообщения.

Управляющие данные от процессора, называемые также *командными словами*, или приказами, инициируют действия, не связанные непосредственно с передачей данных, например, запуск устройства, запрещение прерываний и т. п. В свою очередь, контроллер внешнего устройства формирует электрические сигналы управления самим внешним устройством.

Управляющие данные от внешних устройств называют *словами состояния*; они содержат информацию об определенных признаках, например, о готовности устройства к передаче данных, наличии ошибок при обмене и т. п. Состояние обычно представляется в декодированной форме — 1 бит для каждого признака.

В общем случае внешнее устройство содержит четыре регистра ввода/вывода (рис. 5.8): ***регистр входных данных*** (входной порт), ***регистр выходных данных*** (выходной порт), ***регистр управления*** и ***регистр состояния***. Каждый из этих регистров должен иметь однозначный адрес, который идентифицируется дешифратором адреса.

В зависимости от особенностей работы контроллер внешнего устройства конкретизирует, например, тот факт, что отдельные регистры состояния и управления объединяются в один регистр; в устройстве ввода/вывода имеется только регистр входных (вы-

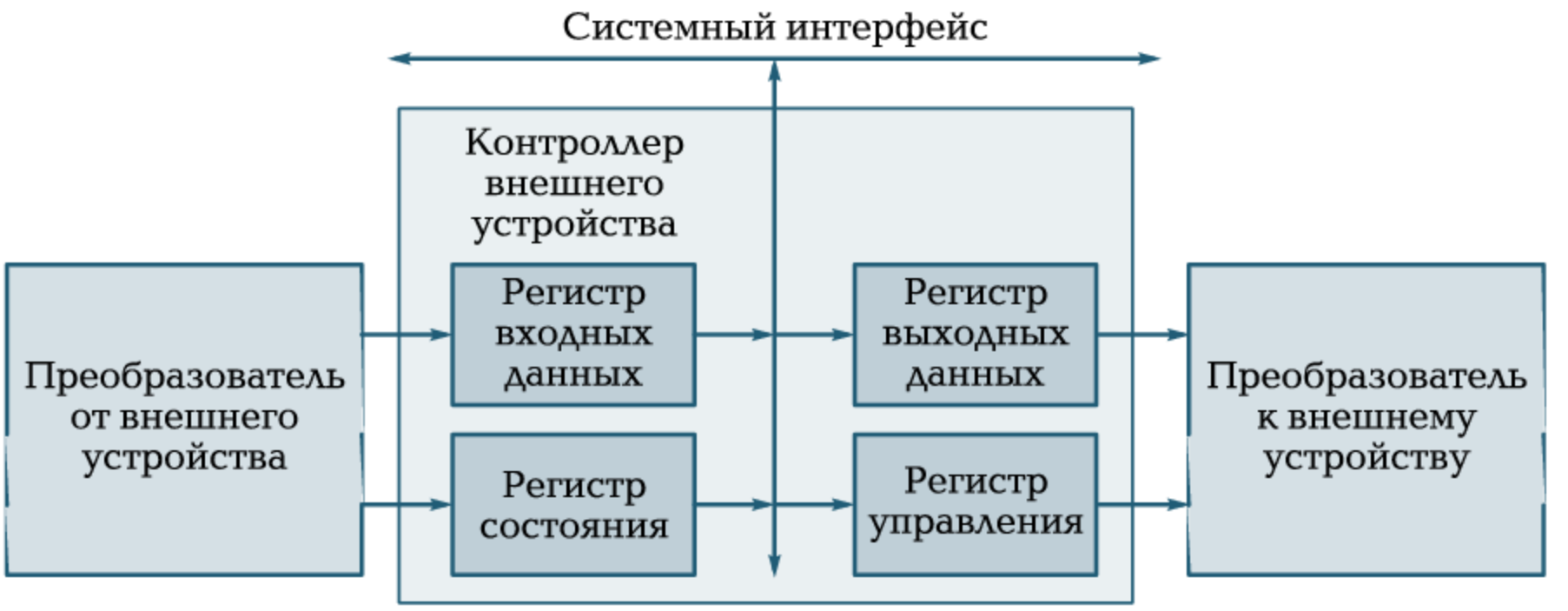


Рис. 5.8. Структурная схема контроллера внешних устройств

ходных) данных; для ввода и вывода используется двунаправленный порт и т. д.

5.6. ПРИНЦИПЫ ОБМЕНА ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Общие сведения. Обмен информацией между цифровыми устройствами является одной из самых важных составляющих системы управления в целом. Отсутствие надежного обмена данными приводит к полной неработоспособности системы или потере управления на каком-то промежутке времени.

Огромное многообразие устройств, входящих в состав микропроцессорной системы управления, а также широкая область их применения делают необходимым использование в каждом конкретном случае наиболее подходящего принципа (метода) обмена цифровой информацией.

Выбор того или иного метода для обмена цифровой информацией между устройствами зависит в основном от следующих факторов:

- расстояния, на которое передаются данные;
- скорости обмена;
- вида используемой линии связи;
- надежности и безопасности передачи данных.

Более жесткие требования, предъявляемые к системам передачи данных, обусловливают и более высокую стоимость системы управления в целом. Снижение стоимости систем передачи данных

зачастую приводит к потере некоторой функциональности, что является допустимым для некоторых систем и совершенно недопустимым для других. Поэтому при разработке системы в первую очередь необходимо учитывать целесообразность выбора системы передачи данных.

Рассмотрим основные принципы работы системы передачи цифровой информации.

Передача цифровых данных по линиям связи. По виду используемой для передачи линии связи различают: симплексную, полудуплексную и дуплексную линии связи.

Симплексная линия связи служит для передачи данных только в одном направлении. Такой вид линии связи применяют в том случае, когда имеется только одно передающее и только одно принимающее устройство.

Полудуплексная линия связи обеспечивает передачу данных в обоих направлениях, но в разные моменты времени (используется так называемое временно́е разделение канала передачи).

Дуплексная линия связи обеспечивает передачу данных в обоих направлениях одновременно.

По принципу обмена цифровой информацией различают: синхронный, асинхронный и обмен по прерыванию.

Синхронный принцип обмена применяют для тех внешних устройств, для которых точно известно время выполнения одной операции (действия). Алгоритм обмена строится таким образом, что команды на обмен идут через промежуток времени, не меньше времени выполнения одной операции обмена.

Для приемника и передатчика имеется общий генератор синхроимпульсов, который задает темп передачи и приема информации и синхронизирует прохождение каждого разряда по линии связи.

Асинхронный принцип обмена информацией применяют в том случае, если промежуток времени между передачей данных определяется самим внешним устройством и заранее не известен.

Контроллер внешнего устройства имеет специальный регистр — регистр состояния. Содержание этого регистра отражает готовность внешнего устройства к обмену. Процессор в цикле непрерывно запрашивает содержимое регистра состояния.

Алгоритм обмена в этом случае строится следующим образом.

1. Запрашивается содержимое регистра состояния внешнего устройства.

2. Если внешнее устройство готово к обмену, то производится переход к п. 3. В противном случае осуществляется возврат к п. 1.

3. Производится передача очередной порции информации (обычно слова).

При асинхронном принципе обмена процессор непрерывно определяет момент готовности внешнего устройства к обмену. Готовность проверяется программным способом, поэтому процессор в этот момент не может быть загружен выполнением какой-либо другой программы.

Обмен по прерыванию предполагает, что готовность к обмену проверяется аппаратным способом с помощью контроллера прерываний, который входит в состав устройств управления процессором. К контроллеру подключаются линии прерываний от контроллеров внешних устройств.

Алгоритм обмена в этом случае функционирует следующим образом.

Процессор выполняет какую-либо программу, не связанную с обменом. Как только внешнее устройство будет готово к обмену, контроллер внешнего устройства формирует сигнал прерывания. Этот сигнал воспринимается контроллером прерываний, который, в свою очередь, прерывает исполнение текущей программы и передает управление программе обмена с этим устройством. После проведения обмена всеми данными управление вновь возвращается к прерванной программе.

В отличие от асинхронного обмена момент готовности внешнего устройства определяется аппаратурой самого контроллера внешнего устройства.

При этом способе центральный процессор не задействован, что дает возможность вести параллельное выполнение других задач (в том числе и обмен данными с другими внешними устройствами). Это существенно повышает производительность микропроцессорной системы в целом.

Способы передачи отдельных слов цифровой информации. Различают параллельный (когда все биты передаваемого слова передаются одновременно) и последовательный (когда биты слова передаются поочередно, начиная, например, с младшего разряда) способы передачи отдельных слов цифровой информации.

Выбор способа передачи цифрового слова зависит от требуемой скорости и расстояния, на которое осуществляется передача.

Между проводниками шины для *параллельной передачи* данных всегда существует электрическая емкость, поэтому при передаче логической «1» по одному из проводников на других проводниках возникают выбросы напряжения во время переднего и заднего фронта передачи бита информации.

С увеличением длины шины передачи емкость между проводниками возрастает, следовательно, увеличивается и влияние помех, поэтому рабочая длина шины при параллельной передаче данных ограничивается 1...2 м. За счет использования шины более высокой стоимости, а также снижения скорости обмена, ее длину можно увеличить до 10...20 м.

Эта причина, а также желание применять телефонные и телеграфные провода обусловили широкое распространение последовательных способов передачи данных.

Различают последовательную синхронную и асинхронную передачу данных.

При *синхронной последовательной передаче данных* каждый передаваемый бит информации сопровождается синхронным импульсом (синхроимпульсом), который передается по отдельной линии и информирует приемник о наличии данных на линии связи.

При *асинхронной последовательной передаче данных* синхроимпульсы не используются (в этом случае нет необходимости в отдельной линии для сигнала синхронизации).

Приемник и передатчик имеют свои внутренние генераторы, которые перед началом передачи слова данных должны быть синхронизированы.

Для определения приемником момента начала и окончания передачи слова данных используется стандартный формат асинхронной последовательной передачи.

В общем случае формат имеет следующий в и д:

- к *N* информационным битам передаваемого слова добавляются три-четыре дополнительных бита, один из которых — стартовый, второй — четности и третий-четвертый стоповые;
- устанавливаются одинаковые частоты генераторов приемника и передатчика.

Когда передатчик бездействует, на линии связи устанавливается высокий уровень сигнала, соответствующий логической «1». Передатчик может в любой момент начать передачу данных путем генерирования стартового бита, т. е. за счет перевода линии связи в состояние, соответствующее логическому «0», на время, точно равное времени передачи бита.

После этого передаются информационные биты, а вслед за ними — бит четности и стоповый бит, который переводит линию связи в состояние, соответствующее логической «1». Если бит четности заполнен логической «1», то стоповый бит не изменяет состояния линии связи.

После окончания стопового бита передатчик может начать новую передачу данных в любой момент.

Приемник и передатчик должны быть согласованы по всем параметрам формата передачи данных, включая номинальную длительность бита. Для этого в приемнике устанавливается генератор синхроимпульсов, частота которого должна совпадать с частотой аналогичного генератора передатчика. Кроме того, для повышения помехозащищенности линии связи, а также защиты от некоторого разброса частот генераторов синхроимпульсов считывание принимаемого бита производится в середине его длительности.

Рассмотрим работу приемника, начиная с момента, когда он закончил прием данных и перешел в режим обнаружения тактового бита следующего слова.

Если линия связи переходит в состояние логического «0» и находится в этом состоянии в течение времени, не меньше половины длительности бита, то приемник переходит в режим считывания битов передаваемого слова.

В противном случае приемник остается в режиме обнаружения стартового бита, так как по всей вероятности процесс перехода линии связи в состояние логического «0» был вызван помехой.

Во время приема слова приемник считывает биты передаваемого слова в середине их длительности. Если во время приема на месте стоповой единицы обнаруживается логический ноль, то считается, что произошла ошибка кадра, и информация принята неправильно.

Кадром называют промежуток времени от начала стартового бита до конца стопового (стоповых) бита (битов).

Если со стоповым битом все в порядке (т. е. присутствует логическая «1»), то проверяется количество единиц в информационных битах и бите четности.

Если число единиц четно, то производится запись передаваемого слова в буфер приемника.

При этом следует иметь в виду, что время, занимаемое последней половиной стопового бита, используется приемником для записи принимаемого слова в буфер приемника и обнаружения ошибки кадра.

Ошибка кадра чаще всего происходит из-за рассинхронизации частот генераторов синхроимпульсов приемника и передатчика.

В результате этого промежуток времени между считыванием битов будет больше или меньше номинальной длительности бита.

5.7. ЦИФРОВЫЕ СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С НАЛОЖЕННОЙ ПОМЕХОЙ. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФИЛЬТРА НИЗКИХ ЧАСТОТ

Общие сведения. Помехи, возникающие в цепях передачи аналоговых сигналов, после цифрового преобразования сигнала становятся неотъемлемой частью цифрового потока данных, не отличимых от полезного сигнала.

Распознание такого рода помех — сложная алгоритмическая задача. Проблема усугубляется тем, что каждый из существующих алгоритмов цифровой обработки обычно требует индивидуальной настройки на какую-то определенную для помехи характеристику. Помехи с другими характеристиками идентифицируются алгоритмом в этом случае как полезный сигнал и не подвергаются ослаблению. Напротив, полезный сигнал, имеющий характеристики, близкие к характеристикам помехи, может быть удален или существенно ослаблен.

Рассмотрим принцип работы нескольких самых распространенных алгоритмов обработки аналоговых сигналов, представленных в цифровом виде.

Алгоритм приема с предсказанием результата. Идея алгоритма основана на том, что для инерционных входных сигналов значения, принятые в данный момент времени, должны мало отличаться от предыдущего принятого значения.

Для определения ожидаемого значения сигнала используется скорость изменения этого сигнала, которая оценивается по предыдущим приемам. Если принятое значение сильно отличается от ожидаемого, то оно просто не используется в последующих расчетах. Критерием помехи в данном случае является максимальная заданная скорость изменения сигнала (обычно единиц измеряемого параметра в секунду или на одно измерение).

Недостаток алгоритма состоит в том, что возможные резкие изменения полезного сигнала алгоритмом никак не отслеживаются, поскольку ничем не отличаются от аномальных изменений сигналов под действием помех.

Статистическая обработка. Одним из наиболее распространенных методов статистической обработки является метод расчета среднеарифметического значения сигнала по нескольким последним отсчетам, также называемый *методом текущего среднего*. Расчет ведется по формуле

$$x_{\text{ср}}(k) = \frac{x(k) + x(k-1) + \ldots x(k-n)}{n+1},$$

где $x(k), x(k-1), \ldots, x(k-n)$ — значения входных сигналов в моменты времени k, $(k-1)$, ..., $(k-\text{n})$ соответственно.

Известно, что если измеряемое значение в текущий момент является случайной величиной, то среднеарифметическое также случайная величина, однако дисперсия результирующего значения в n раз меньше дисперсии отдельных наблюдений.

Если значение сигнала рассчитывается как среднеарифметическое набора только накопленных измерений, причем для очередного расчета используется новый набор измерений, то применяют *интегрирующий метод*, являющийся одним из самых эффективных методов борьбы с помехами.

Цифровая фильтрация сигнала. Наиболее часто для подавления помех используют цифровую реализацию фильтра низких частот с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{T_{\text{ф}} p + 1}, \qquad (5.1)$$

где $T_{\text{ф}}$ — постоянная времени фильтра.

Такие фильтры также часто называют *математическими*, или *цифровыми*. Фильтр реализуется программным способом и предназначен для пропускания без искажений к приемнику сигналов величины, которая изменяется с одной частотой и для задержки или пропускания с большим затуханием сигналов других частот.

Диапазон частот, пропускаемых фильтром с регламентированным затуханием, называют *полосой пропускания*, или полосой прозрачности. Для фильтра низких частот полоса пропускания это диапазон от $\omega = 0$ до некоторой частоты ω_0, для которой выполняется соотношение:

$$A(\omega_0) = \frac{\sqrt{2}}{2} A(0) = 0{,}707 A(0). \qquad (5.2)$$

Для фильтра низких частот амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) определяется выражением:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{T_{\text{ф}}^2 \omega^2 + 1}}. \qquad (5.3)$$

Определим диапазон работы фильтра. При $\omega = 0$ $A(0) = 1$. При $\omega = \omega_0$ из (5.2) и (5.3) получим:

$$A(\omega_0) = \frac{1}{\sqrt{T_ф^2\omega^2 + 1}} = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Отсюда, после преобразований, имеем:

$$\frac{1}{\sqrt{2\left(T_ф^2\omega^2 + 1\right)}} = \frac{1}{2}.$$

Возведем обе части уравнения в квадрат:

$$T_ф^2\omega^2 + 1 = 2,$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{1}{T_ф}.$$

Таким образом, получили полосу прозрачности фильтра:

$$0 \le \omega \le \frac{1}{T_ф}.$$

Рассмотрим программную реализацию фильтра.

Процесс фильтрации можно представить дифференциальным уравнением, полученным из передаточной функции (5.1). Обозначим входной сигнал фильтра через x, а выходной — через y, получим:

$$\frac{1}{T_ф p + 1} x = y.$$

Отсюда

$$\left(T_ф p + 1\right) y = x$$

Перейдем от операторной формы записи к дифференциальному уравнению:

$$T_ф \frac{dy}{d\tau} + y = x. \qquad (5.4)$$

Заменим производную в дифференциальном уравнении конечной разностью первого порядка, т. е.

$$\frac{dy}{d\tau} \approx \frac{\Delta y}{\Delta\tau}.$$

Так как считывание сигнала в цифровых системах происходит с заданным периодом $T_и$, последовательные отсчеты измеряемой величины можно представить так:

$$y\big((k-1)T_{\text{и}}\big),\ \ y\big(kT_{\text{и}}\big),\ \ y\big((k+1)T_{\text{и}}\big),\ldots,$$

где k — номер отсчета.

Тогда дифференциальное уравнение (5.4) можно заменить разностным аналогом следующего вида:

$$x=\frac{y\big(kT_{\text{и}}\big)-y\big((k-1)T_{\text{и}}\big)}{T_{\text{и}}}T_{\text{ф}}+y\big(kT_{\text{и}}\big).$$

Для упрощения записи опустим период квантования $T_{\text{и}}$ входных и выходных сигналов фильтра, тогда для k-го момента времени дифференциальное уравнение фильтра может быть заменено следующим разностным уравнением:

$$x=\frac{y(k)-y(k-1)}{T_{\text{и}}}T_{\text{ф}}+y(k). \qquad (5.5)$$

Из выражения (5.5) выразим числитель:

$$y(k)-y(k-1)=\frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{ф}}}\big(x(k)-y(k)\big).$$

Произведем замену $\dfrac{T_{\text{и}}}{T_{\text{ф}}}=\varphi,$ получим:

$$y(k)-y(k-1)=\varphi\big(x(k)-y(k)\big).$$

Для инерционных низкочастотных входных сигналов без большой погрешности в правой части последнего уравнения текущее значение сигнала $y(k)$ можно заменить на предыдущее $y(k-1)$, тогда выходной сигнал фильтра $y(k)$ выразится через входной сигнал $x(k)$ и предыдущее значение выходного $y(k-1)$ следующим образом:

$$y(k)=y(k-1)+\varphi\big(x(k)-y(k)\big).$$

В таком виде программная реализация фильтра низких частот называется *алгоритмом экспоненциального сглаживания*. Выходной сигнал фильтра зависит только от текущего входного сигнала и выходного сигнала фильтра в предыдущий отсчет. При $\varphi=1$ $y(k)=x(k)$ — сглаживания нет.

Второй вариант реализации цифрового фильтра низких частот получится, если в разностном уравнении не производить замену $y(k)$ на $y(k-1)$, в этом случае функция цифрового фильтра низких частот будет иметь вид:

$$y(k)=\frac{\varphi x(k)+y(k-1)}{1-\varphi}.$$

Способы борьбы с помехами в каналах передачи цифровых сигналов. Помеха, возникающая в канале передачи цифровых сигналов, представляет собой инвертирование отдельных бит информационного слова, происходящее под действием электрической помехи. Основной метод обнаружения возникновения ошибки — *метод использования битов четности*.

Данный метод заключается в добавлении к битам информационного слова одного или нескольких битов четности. Содержание этих битов подбирается таким образом, чтобы общее число единичных битов расширенного слова было четным.

Использование одного бита четности, добавляемого к информационному слову, позволяет обнаружить факт возникновения только одной ошибки. Место возникновения ошибки (т. е. разряд, в котором возникла ошибка) обнаружить не представляется возможным. Также, если при передаче исчезнут две единицы (произойдет их инверсия в логический «0»), то четность не нарушится и ошибка не будет обнаружена.

Если к N информационным битам добавить K битов четности и соответствующим образом расположить их среди информационных битов, то можно определить место возникновения ошибки и исправить ее.

Такие расширенные коды впервые были предложены Р. Хеммингом в 1948 г. и с тех пор называются *кодами Хемминга*.

В кодах Хемминга все биты передаваемого слова нумеруются слева направо и нумерация начинается с единицы (а не с нуля, как при передаче простого слова).

Биты, номера которых равны степени числа 2, заполняются битами четности. Остальные биты являются информационными. Так, например, к 16 информационным битам передаваемого слова необходимо добавить 5 битов четности, располагая в разрядах 1, 2, 4, 8, 16. Биты с номерами 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21 содержат разряды информационного слова (рис. 5.9).

Каждый разряд бита четности контролирует строго определенные разряды расширенного слова. Номера контролируемых разрядов для битов четности приведены в табл. 5.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
×	×	+	×	+	+	+	×	+	+	+	+	+	+	+	×	+	+	+	+	×

Рис. 5.9. Структура расширенного слова с кодом Хемминга («×» — разряды битов четности; «+» — разряды информационного слова)

Таблица 5.1. Номера контролируемых разрядов расширенного слова битами четности

Контрольный разряд	Контролируемый разряд
1	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25
2	2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 22, 23, 26
4	4, 5, 6, 7, 12, 13, 14, 15, 20, 21, 22, 23, 28
8	8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 24, 25, 26, 27
16	16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29
32	32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44

В число контролируемых разрядов включаются и сами биты четности. Содержание каждого бита четности подбирается таким образом, чтобы общее число единиц в контролируемых разрядах обязательно было четным.

Установлено, что с помощью пяти битов четности можно контролировать 31 разряд, из которых 26 разрядов будут информационными. Такие коды Хемминга в литературе обозначают H(31,26).

Поскольку в вычислительной технике информационные слова имеют длину 8, 16, 32, ... бит, то пять битов четности защищают от ошибки меньшее число разрядов, чем могли бы, т. е. всего 16 бит.

Пример. Рассмотрим использование кодов Хемминга для контроля правильности передачи информационного слова.

Пусть принятое слово имеет вид:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1

Проанализируем принятое слово на наличие ошибок.

Определим, правильный ли первый бит четности: в разрядах 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21 содержатся шесть единиц — эти биты приняты правильно.

Определим, правильный ли второй бит четности: в разрядах 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 19 содержатся четыре единицы — эти биты приняты правильно.

Определим, правильный ли четвертый бит четности: в разрядах 4, 5, 6, 7, 12, 13, 14, 15, 20, 21 содержатся шесть единиц — эти биты приняты правильно.

Определим, правильный ли восьмой бит четности: в разрядах 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 содержатся четыре единицы — эти биты приняты правильно.

Определим, правильный ли шестнадцатый бит четности: в разрядах 16, 17, 18, 19, 20, 21 содержатся четыре единицы — эти биты приняты правильно.

Таким образом, можно сделать вывод, что слово принято правильно.

Рассмотрим это же информационное слово, если пятый бит содержит ошибку, т. е. вместо логической «1» был принят логический «0».

Определим, правильный ли первый бит четности: в разрядах 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21 содержатся пять единиц — эти биты приняты неправильно.

Определим, правильный ли второй бит четности: в разрядах 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 19 содержатся четыре единицы — эти биты приняты правильно.

Определим, правильный ли четвертый бит четности: в разрядах 4, 5, 6, 7, 12, 13, 14, 15, 20, 21 содержатся пять единиц — эти биты приняты неправильно.

Определим, правильный ли восьмой бит четности: в разрядах 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 содержатся четыре единицы — эти биты приняты правильно.

Определим, правильный ли шестнадцатый бит четности: в разрядах 16, 17, 18, 19, 20, 21 содержатся четыре единицы — эти биты приняты правильно.

Таким образом, можно констатировать, что в принятом слове имеется ошибка. Определим место (разряд), где произошла ошибка.

Так как первый бит четности неправильный, то это означает, что ошибка могла произойти в битах 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21. Так как второй бит четности правильный, то это позволяет исключить из числа подозрительных битов 3, 7, 11, 15, 19. Остаются биты 5, 13, 21.

Так как восьмой и шестнадцатый бит приняты правильно, то биты 13 и 21 приняты без ошибок. Остается один бит 5, в котором и произошла ошибка. Если инвертировать этот бит, то ошибка будет исправлена.

Определить место (разряд) ошибки можно также по следующему *правилу*: номер разряда с ошибкой равен сумме номеров неправильных битов четности.

Один из существенных недостатков данного метода — невозможность определить места расположения двух и более ошибок.

Глава 6

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Технические средства автоматизации. К техническим средствам автоматизации относятся все устройства, входящие в систему управления и предназначенные для получения, передачи, хранения и преобразования информации, а также осуществления управляющих воздействий на объект управления:

- датчики и контрольно-измерительные приборы;
- усилительно-преобразующие устройства;
- задающие устройства;
- исполнительные механизмы и регулирующие органы;
- автоматические регуляторы;
- микропроцессорные устройства и вычислительная техника.

Оптимальный выбор технических средств автоматизации определяется особенностями технологических процессов, задачами автоматизации, критериями надежности, экономичности, безопасности, эргономичности и т. д.

Измерения и измерительная техника. *Измерение* — это нахождение значения некоторой физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Средства измерений — это технические средства, которые имеют нормированные метрологические характеристики:

- мера;
- измерительные приборы;
- измерительные преобразователи;
- измерительные системы;
- установки;
- комплексы.

Мера — эталонное средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера или количества.

Измерительный прибор — средство измерений, предназначенное для выдачи количественной информации об измеряемой величине в доступной для восприятия форме. Измерительные приборы подразделяют на показывающие и регистрирующие. Показывающие измерительные приборы предназначены для отсчитывания результата измерений в аналоговой или цифровой форме, регистрирующие — для регистрации (записи или печати) результатов измерения.

Измерительный преобразователь — средство для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поступающей непосредственно на датчики (сенсоры), нормирующие и масштабирующие устройства, усилители и др.

Датчик — первичный измерительный преобразователь, предназначенный для непосредственного восприятия воздействия измеряемой величины.

По метрологическому назначению средства измерений подразделяют на эталонные, образцовые и рабочие.

Рабочие средства измерений применяют для повседневных измерений в промышленных и лабораторных условиях, не связанных с передачей измерительных мер.

Образцовые средства измерений предназначены для передачи измерительных мер от эталонов к рабочим средствам измерения, т. е. служат для их поверки.

Эталон обеспечивает воспроизведение и хранение единицы физической величины для передачи ее размера средствам измерения более низкого ранга, чем указанные ранее.

В зависимости от получения результата измерения различают прямые, косвенные и совокупные измерения.

Прямые измерения предусматривают определение искомого значения физической величины непосредственно из опытных данных (например, определение температуры термометром или тока, протекающего в цепи — амперметром и т. д.).

Косвенные измерения — это измерение не самой физической величины, а величины, функционально связанной с ней (например, измерение мощности постоянного тока с помощью амперметра и вольтметра с последующим расчетом мощности по известной зависимости $P = UI$ или расхода по перепаду давления на сужающемся устройстве).

Совокупные измерения — одновременные измерения нескольких однородных величин, на основании которых находят значения искомой величины.

Методы измерений. Прежде чем производить измерения, необходимо в зависимости от требуемой точности и наличия измерительных приборов выбрать соответствующий метод измерения.

Метод измерения — совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Измерения проводятся одним из двух методов: непосредственной оценки или сравнения с мерой.

При использовании ***метода непосредственной оценки*** значение искомой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора (например, измерение давления манометром, температуры — термометром, тока — амперметром и т. д.).

Метод сравнения с мерой предусматривает сравнение измеряемой искомой величины с однородной величиной, воспроизводимой мерой.

Данный метод имеет ряд разновидностей: дифференциальный (разностный) метод, нулевой метод, метод замещения (компенсационный).

При *дифференциальном методе* на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и образцовой, воспроизводимой мерой. Чем меньше разность, тем точнее результат. Предельным случаем дифференциального метода является *нулевой метод*, при котором разность доводится до нуля.

При использовании *метода замещения* измеряемая величина замещается известной величиной, воспроизводимой мерой. При этом замещение измеряемой величины производят так, что показания прибора будут одинаковы в обоих случаях, т. е. никаких измерений в принципе не происходит.

Погрешности измерений. Результат измерений физической величины всегда отличается от истинного значения на некоторую величину, которая называется *погрешностью*.

Классификация погрешностей в зависимости от источника возникновения, условий проведения измерений, характера проявления измеряемой величины во времени и способа ее выражения приведена на рис. 6.1.

Методическая погрешность обусловлена несовершенством метода и приемов использования средств измерений (например, при определении мощности постоянного тока по показаниям амперметра и вольтметра без учета мощности, потребляемой указанными приборами, возникает методическая погрешность).



Рис. 6.1. Классификация погрешностей средств измерения

Инструментальная погрешность связана с погрешностью изготовления средств измерений (например, неточности при изготовлении приборов, повышенные зазоры, люфты, неточность градуировки и т.д.).

Субъективная погрешность обусловлена несовершенством органов чувств оператора.

Основная погрешность — погрешность, возникающая в нормальных условиях эксплуатации средства измерения (температура, влажность, напряжение питания и др.), которые нормируются и указываются в стандартах или технических условиях.

Дополнительная погрешность связана с отклонением одной или нескольких влияющих величин от нормального значения (например, изменение температуры окружающей среды, изменение влажности, колебания напряжения питающей сети). Значение до-

полнительной погрешности нормируется и указывается в технической документации на средства измерения.

Систематическая погрешность — постоянная или закономерно изменяющаяся погрешность средства измерения при повторных измерениях одной и той же величины в одинаковых условиях измерения (например, погрешность, возникающая при измерении сопротивления ампервольтметром, обусловленная разрядом батареи питания).

Случайная погрешность — погрешность измерения, характер изменения которой при повторных измерениях одной и той же величины в одинаковых условиях случайный. Случайную погрешность можно определить только с использованием методов статистического анализа для многократных измерений различных значений измеряемой величины.

Грубая погрешность (*промах*) измерения существенно превышает ожидаемую в данных измерениях.

Статическая погрешность — погрешность, возникающая при измерении постоянной по времени величины (например, погрешность измерения неизменных за время измерения температуры, давления и т. д.).

Динамическая погрешность — погрешность измерения изменяющейся во времени величины (например, погрешность измерения, возникающая в момент подключения измерительного прибора или различных коммутаций в технологических процессах, обусловленная переходными процессами при коммутации; зависит от быстродействия измерительного прибора).

Абсолютная погрешность измерения Δ — разность между результатом измерения X и истинным значением измеряемой величины X_0:

$$\Delta = X - X_0.$$

Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность измерения δ — отношение абсолютной погрешности измерения Δ к истинному значению измеряемой величины X_0:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_0} = \frac{X - X_0}{X_0} 100\ \%.$$

Относительная погрешность — безразмерная величина (может быть выражена в процентах). Поскольку истинное значение измеряемой величины X_0 неизвестно, то практически используют

действительное значение измеряемой величины $X_д$, при этом принимается $X_0 = X_д$.

Действительное значение $X_д$ находят экспериментально путем применения более точных методов и средств измерений. Обычно за действительное значение принимают показания образцовых средств измерения.

Приведенная погрешность измерения γ — это отношение абсолютной погрешности Δ к некоторому нормирующему значению измеряемой величины $X_N = (X_{max} - X_{min})$ — установленному значению ширины диапазона или определенному значению, к которому относится выражение значения характеристики:

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_{max} - X_{min}} 100\,\%,$$

где X_{max} и X_{min} — верхняя и нижняя границы диапазона измерения.

Класс точности — это обобщенная характеристика средств измерений, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющих на их точность.

Пределы допускаемых погрешностей устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений. Класс точности не является непосредственным показателем точности средств измерения, а характеризует только их свойства в отношении точности, так как на точность измерения влияют также методы и условия проведения измерений.

Пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей средств измерений устанавливаются для каждого класса точности в виде абсолютных, относительных и приведенных погрешностей.

Если для средств измерения предел дополнительной погрешности выражается в абсолютных единицах измерения, то класс точности представляется условным порядковым номером, причем при большей допускаемой погрешности присваивается класс с бóльшим порядковым номером (например, Кл. № 1, Кл. № 3 и т. д.).

Средствам измерения, пределы допускаемой основной погрешности которых заданы в виде приведенных или относительных погрешностей, присваиваются классы точности, выбираемые из стандартного ряда:

$$K = (1{,}0;\ 1{,}5;\ 2{,}0;\ 2{,}5;\ 3{,}0;\ 4{,}0;\ 5{,}0;\ 6{,}0)10^n, \text{ где } n = 1,\ 0,\ -1,\ -2.$$

В скобках указаны значения погрешностей, выраженные в процентах, при этом чем выше класс точности, тем меньшим значением

он обозначен. Например, класс точности 0,5 (K = 5; $n = -1$) выше класса точности 1,5 (K = 1,5; $n = 0$).

Таким образом, класс точности для средств измерения может быть определен как предел основной погрешности, приведенный ко всему диапазону измерения, выраженный в процентах.

6.2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Общие сведения. Типовые технологические процессы промышленного производства включают в себя контроль и управление следующими основными параметрами:

- температурой материалов и рабочего пространства нагревательных устройств;
- расходом жидкости и газа;
- давлением;
- уровнем жидких и сыпучих материалов.

Для контроля этих параметров используется набор типовых технических средств, позволяющих осуществлять измерения требуемого параметра и передачу измеренной величины в систему управления.

Рассмотрим принцип работы типовых технических средств контроля основных технологических параметров.

Измерение температур. Методы измерения температуры классифицируются по термометрическому признаку:

- *тепловое расширение* — принцип действия приборов основан на тепловом расширении жидкости, заключенной в рабочем объеме термометра (жидкостные стеклянные термометры), или изменении размеров твердого тела (биметаллические и дилатометрические термометры) в зависимости от изменения температуры;
- *изменение давления* (*объема*) *в замкнутом пространстве* — изменение объема или давления рабочего вещества в зависимости от температуры (жидкостные, газовые и конденсационные манометрические термометры);
- *термоэлектрический эффект Томсона и Зеебека* — принцип действия приборов основан на возникновении тока в цепи, состоящей из двух разнородных проводников, при нарушении теплового равновесия места их контактирования (термоэлектрические преобразователи или термопары);

- *изменение электрического сопротивления* — изменение сопротивления металла или полупроводниковых материалов при изменении температуры (термометры сопротивления);
- *тепловое излучение* — изменение энергетической светимости абсолютно черного тела в зависимости от температуры и длины волны, на которой происходит тепловое излучение (радиационные, яркостные и цветовые пирометры).

Наиболее удобными методами измерения температуры при построении систем управления являются те, в которых термометрическим признаком является электрический сигнал.

Рассмотрим применение различных методов измерения температуры в системах измерения и контроля.

Термоэлектрические преобразователи (см. рис. 3.10) могут подключаться к измерительному прибору (милливольтметру, потенциометру и т. п.) по одной из двух схем (см. рис. 3.10, *б*, *в*). Подключение измерительного прибора в контур термопары по обеим схемам одинаково правомочно.

Рассмотрим измерительные приборы (ИП), применяемые с термопарой и реализующие различные методы измерения термоЭДС.

Основными частями *милливольтметра* являются постоянный магнит *1* с полюсными наконечниками *2*, сердечник *3* из магнитомягкой стали, рамка *4* из большого числа витков (как правило, медной проволоки) (рис. 6.2). Рамка жестко скреплена со стрелкой и образует подвижную систему милливольтметра, которая может поворачиваться вокруг своей оси. Подвод тока к рамке осуществляется через спиральные пружинки. Ток, протекающий через рамку, взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита, при этом создается вращающий момент, который поворачивает рамку на определенный угол, пропорциональный протекающему току. Рамка останавливается, когда созданный вращающий момент уравновесится упругими силами спиральных пружин.

Потенциометры работают на компенсационном методе, который основан на уравновешивании измеряемой термоЭДС известным напряжением, получаемым от строго определенного тока на сопротивлении с известным значением.

Электрическая схема потенциометра образована тремя цепями (рис. 6.3): первая — цепь батареи — состоит из источника постоянного тока E, сопротивления реостата $R_т$, секционного резистора $R_с$, сопротивления реохорда $R_р$ и резистора $R_{НЭ}$; вторая — цепь термопары — включает в себя источник термоЭДС $E(t, t_0)$, часть секционного резистора $R_с$, сопротивление реохорда $R_р$ и нульприбор (НП); третья — цепь нормального элемента — служит для

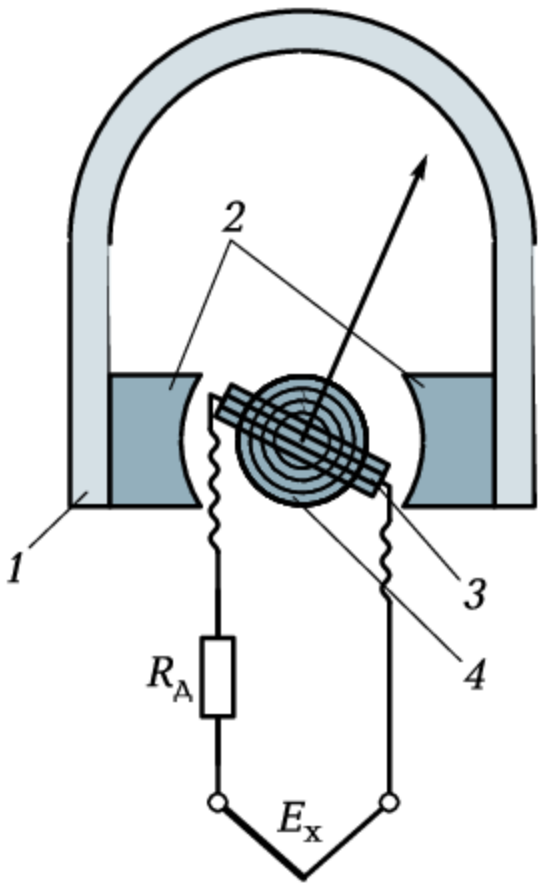


Рис. 6.2. Устройство милливольтметра

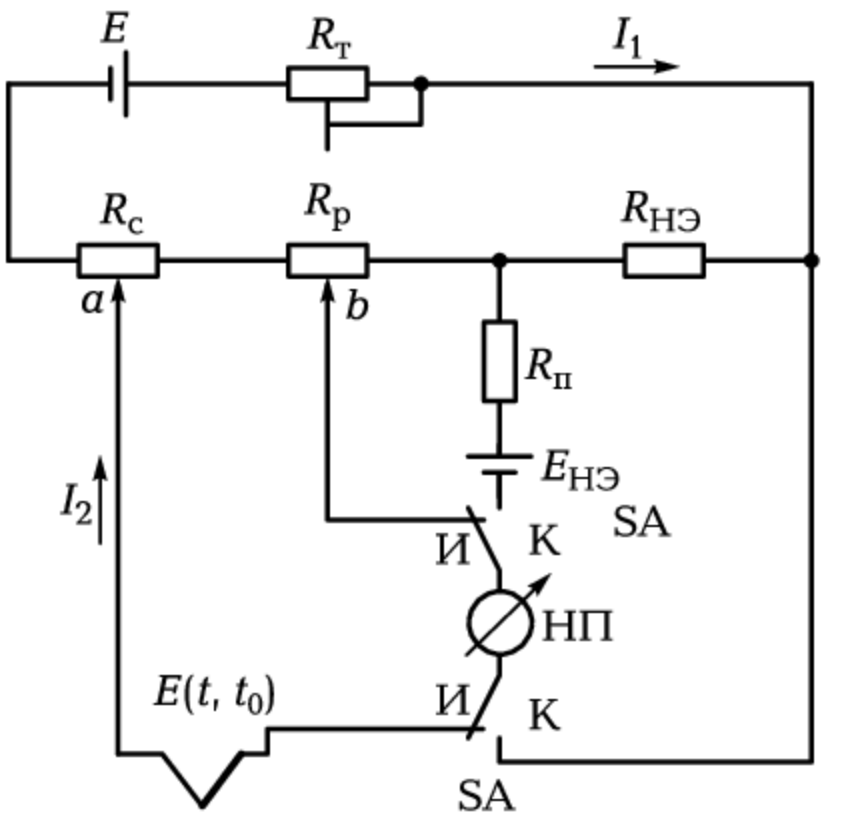


Рис. 6.3. Электрическая схема потенциометра

установки рабочего тока в первой цепи и состоит из нормального элемента $E_{НЭ}$ и резистора $R_п$.

При установке рабочего тока переключатель SA переводится в положение К-контроль. При этом цепь батареи включается в цепь нормального элемента. Стрелка нуль-прибора при этом устанавливается на нуль с помощью реостата $R_т$.

Для измерения термоЭДС переключатель переводится в положение И — измерение, а в цепь источника тока E включается цепь термопары. Движки секционного резистора $R_с$ и реохорда $R_р$ перемещают до тех пор, пока термоЭДС термопары полностью не компенсируется равной и противоположно направленной разностью потенциалов, создаваемой током батареи на участке ab. В таком положении стрелка нуль-прибора устанавливается на нуль, а отсчет производится по сумме падений напряжений на секционном резисторе $R_с$ и реохорде $R_р$ в милливольтах (мВ).

В основу работы *вторичного прибора Диск-250* положен принцип электромеханического следящего уравновешивания (рис. 6.4).

Входной сигнал от датчика (Д) поступает вначале во входное устройство (ВхУ), где нормализуется по нижнему пределу измерения, затем — на усилитель входного сигнала (УВС), где нормализуется по верхнему пределу измерения (ПУ — предварительный усилитель; ОкУ — окончательный усилитель). Сигнал с реохорда (R), усиленный усилителем (УР), сравнивается на входе усилителя небаланса (УН) с сигналом УВС.

Работа прибора происходит следующим образом. При изменении параметра на входе усилителя УН появляется сигнал небаланса, который усиливается и управляет работой двигателя (ДВ). Двигатель в свою очередь перемещает движок реохорда R до тех пор, пока сигнал с усилителя УР не станет равным (по абсолютной величине) сигналу с усилителя УВС. Таким образом, каждому значению измеряемого параметра соответствует определенное положение движка реохорда и связанного с ним указателя прибора.

Сигнал с усилителя УВС поступает на входы усилителей выходных устройств:

- ВУ1 — устройство преобразования входного сигнала в выходной электрический унифицированный сигнал 0…5 или 4…20 мА;
- ВУ2 — трехпозиционное регулирующее устройство;
- ВУ3 — устройство сигнализации о выходе измеряемого параметра за нижний допустимый предел;
- ВУ4 — устройство сигнализации о выходе измеряемого параметра за верхний допустимый предел измерения;
- ВУ5 — выходное устройство, реализующее функцию П- или ПИ-регулятора.

Перевод измеренной термоЭДС в температуру осуществляется с использованием номинальных статических характеристик (НСХ) в зависимости от типа используемой термопары, которые определяют значение термоЭДС в зависимости от разницы температур $t_1 - t_0$. Если температура t_0 (свободных концов) равна нулю, то значение термоЭДС будет соответствовать значению измеряемой температуры t_1, что и будет отражать измерительный прибор. Если

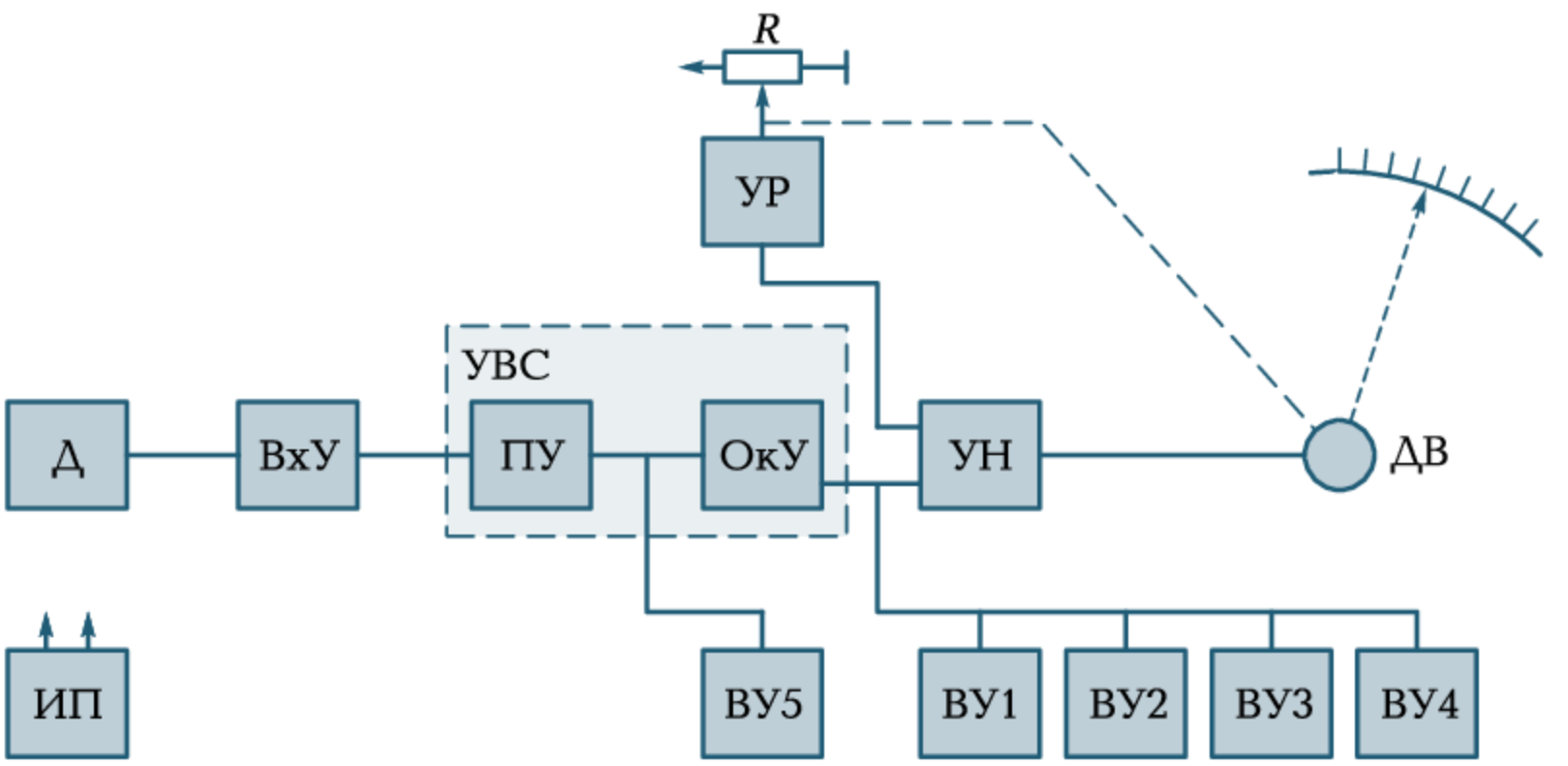


Рис. 6.4. Устройство вторичного прибора Диск-250 (ИП — источник питания)

температура свободных концов термопары отлична от нуля, то показания прибора будут отличаться от градуировочной характеристики.

Введение поправки на температуру свободных концов термопары производят следующими способами:

- применяют удлиняющие термоэлектродные провода, изготовленные из материалов, имеющих термоэлектрическую характеристику, совпадающую с характеристикой используемого термоэлектрического преобразователя в интервале температур от 0 до 100 ... 200 °С, включенных таким образом, чтобы паразитные термоЭДС, образующиеся в местах контактирования, были включены встречно и равны по величине;
- с помощью компенсирующего моста (рис. 6.5) для автоматического введения поправки, который представляет собой неравновесный мост с постоянными манганиновыми резисторами R_1, R_2, R_3 и медным резистором $R_м$, находящимся в равновесии при 0 °С; при отклонении температуры свободных концов возникающий разбаланс моста U_{ab} компенсирует возможное снижение измеряемой термоЭДС (ИПС — источник питания стабилизированный);
- используют медное сопротивление в автоматических потенциометрах;
- термостатирование свободных концов при постоянной температуре 0 °С или (50 ± 0,5)°С.

Термометры сопротивления. Принцип действия термометров сопротивления основан на изменении активного сопротивления терморезистора при изменении температуры (металлические — медные и платиновые и полупроводниковые).

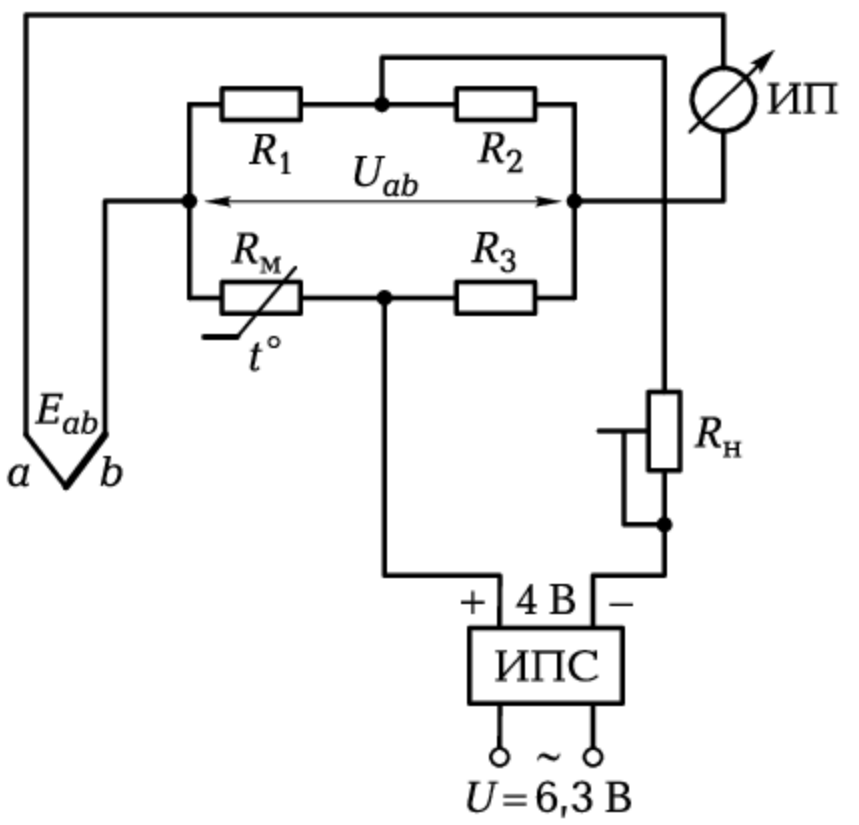


Рис. 6.5. Введение поправки с помощью компенсирующего моста

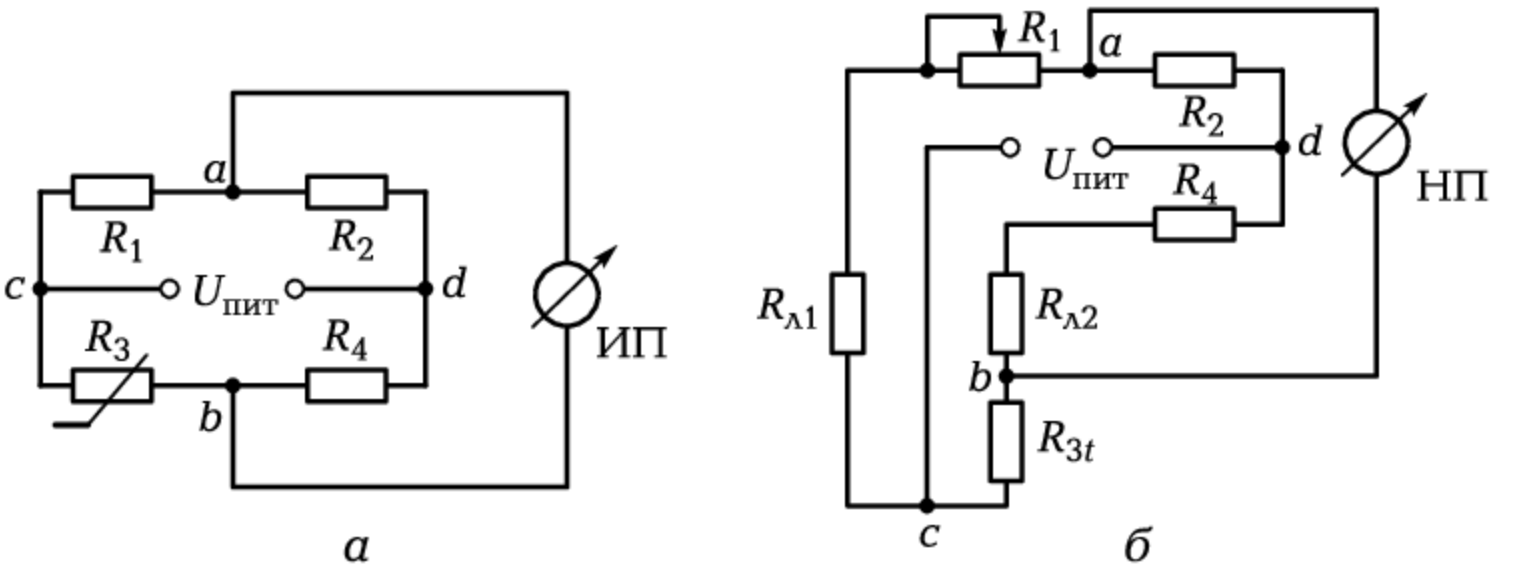


Рис. 6.6. Мостовые схемы измерения термосопротивлений:

а — схема неуравновешенного моста; *б* — схема уравновешенного моста

Измерительные приборы, применяемые с термометрами сопротивления, принципиально строятся по двум схемам измерения сопротивления: схема неуравновешенного и схема уравновешенного моста.

Простейшая схема *неуравновешенного моста* состоит из плеч R_1, R_2, R_3, R_4 и двух диагоналей: диагонали питания cd и диагонали измерения ab (рис. 6.6, *а*).

Основным условием равновесия моста является равенство произведений противоположных плеч моста:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3.$$

Если равенство соблюдается, то в измерительной диагонали неуравновешенного моста напряжение $U_{ab} = 0$. Если одно из сопротивлений (например, R_3) выполнить из меди или платины и поместить в измеряемую среду, а остальные (R_1, R_2 и R_4) из манганина, то при изменении температуры среды равновесие моста нарушается и через измерительный прибор потечет ток. Сила тока будет тем больше, чем более нарушено равновесие моста.

Преимуществом неуравновешенных мостов является их повышенная чувствительность к малым изменениям сопротивления, но для измерения температуры их применяют нечасто, так как шкала температур нелинейна.

Для измерения температуры обычно используют *уравновешенные мосты* (рис. 6.6, *б*). В них одно из сопротивлений R_1, R_2, R_4 выполняют переменным, а вместо измерительного прибора (ИП) берут нуль-прибор. При нарушениях равновесия моста перемещают движок реохорда R_1 до тех пор, пока НП не покажет нуль. Мост уравновешен. Отсчет измеряемого сопротивления производится по положению движка реохорда. Шкала такого прибора линейна.

Для устранения влияния сопротивления соединительных проводов питание моста (точка *c*) присоединено непосредственно к термометру. В этом случае условие равновесия моста запишется так:

$$(R_1 + R_{л1})R_{3t} = R_2(R_4 + R_{л2}).$$

Термоэлектрические пирометры, использующие лучистую энергию нагретых тел, нашли большое распространение при измерении температуры. Методы измерения температуры по излучению основаны на законах, установленных для абсолютно черного тела. Энергетическую светимость (яркость) абсолютно черного тела можно определить по уравнению Планка. Для коротких длин волн зависимость энергетической светимости черного тела от длины волны может быть выражена уравнением Ви́на:

$$E^0_{\lambda T} = C_1\lambda^{-5}e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}\Delta\lambda,$$

где $E^0_{\lambda T}$ — энергетическая светимость, Вт/м^2; λ — длина волны, м; $\Delta\lambda$ — спектральный интервал, м; C_1, C_2 — постоянные коэффициенты: $C_1 = 3{,}7418 \cdot 10^{-16}$ Вт/м^2; $C_2 = 1{,}438 \cdot 10^{-2}$ м $\cdot$ К; T — температура, К.

Для каждой температуры абсолютно черного тела значение максимума энергетической светимости соответствует строго определенной длине волны. Характер смещения максимума излучения выражается законом смещения Ви́на:

$$E^0_{\lambda \max T} = AT^5\Delta\lambda,$$

где A — переводной коэффициент, определяемый из соотношения:

$$A = \frac{C_1}{C_2}\frac{\gamma^5}{e^{-\gamma} - 1}; \gamma = \frac{C_2}{\gamma_{\max}T}.$$

Суммарная мощность, излучаемая абсолютно черным телом, по всему спектру определяется законом Стефана — Больцмана:

$$E^0_T = \sigma T^4,$$

где σ — постоянная ($\sigma = 5{,}6696 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 \cdot$ К^4)).

Законы теплового излучения лежат в основе следующих методов измерения температуры:

- радиационная пирометрия, использующая зависимость от температуры общего количества энергии, излучаемой телом в широком спектральном диапазоне (пирометры полного излучения);

- яркостная пирометрия — изменение яркости нагретого тела от температуры на определенной длине волны (пирометры частичного излучения);
- цветовая пирометрия — изменение распределения энергии внутри данного участка спектра излучения в зависимости от температуры (пирометры спектрального излучения).

Устройство *радиационного пирометра* представлено на рис. 6.7, *а*.

Излучение исследуемого объекта концентрируется объективом *1* через диафрагму *2* на рабочих концах термобатареи. Термобатарея представляет собой соединенные последовательно несколько термопар, припаянных к платиновому лепестку *3*, покрытому платиновой чернью.

Для наилучшего поглощения лучей можно считать, что подобным лепестком поглощается 98…99 % падающих на него лучей. Термобатарея с лепестком помещена в стеклянную коробочку. Экран *4* защищает термобатарею от механических повреждений и рассеянных излучений со стороны стенок телескопа, температура которых изменяется в зависимости от условий эксплуатации.

При измерении высоких температур для защиты глаз при установке телескопа перед окуляром в поле зрения устанавливают красное стекло *5*. Наводка осуществляется таким образом, что лепесток полностью перекрывается изображением объекта измерения, тогда

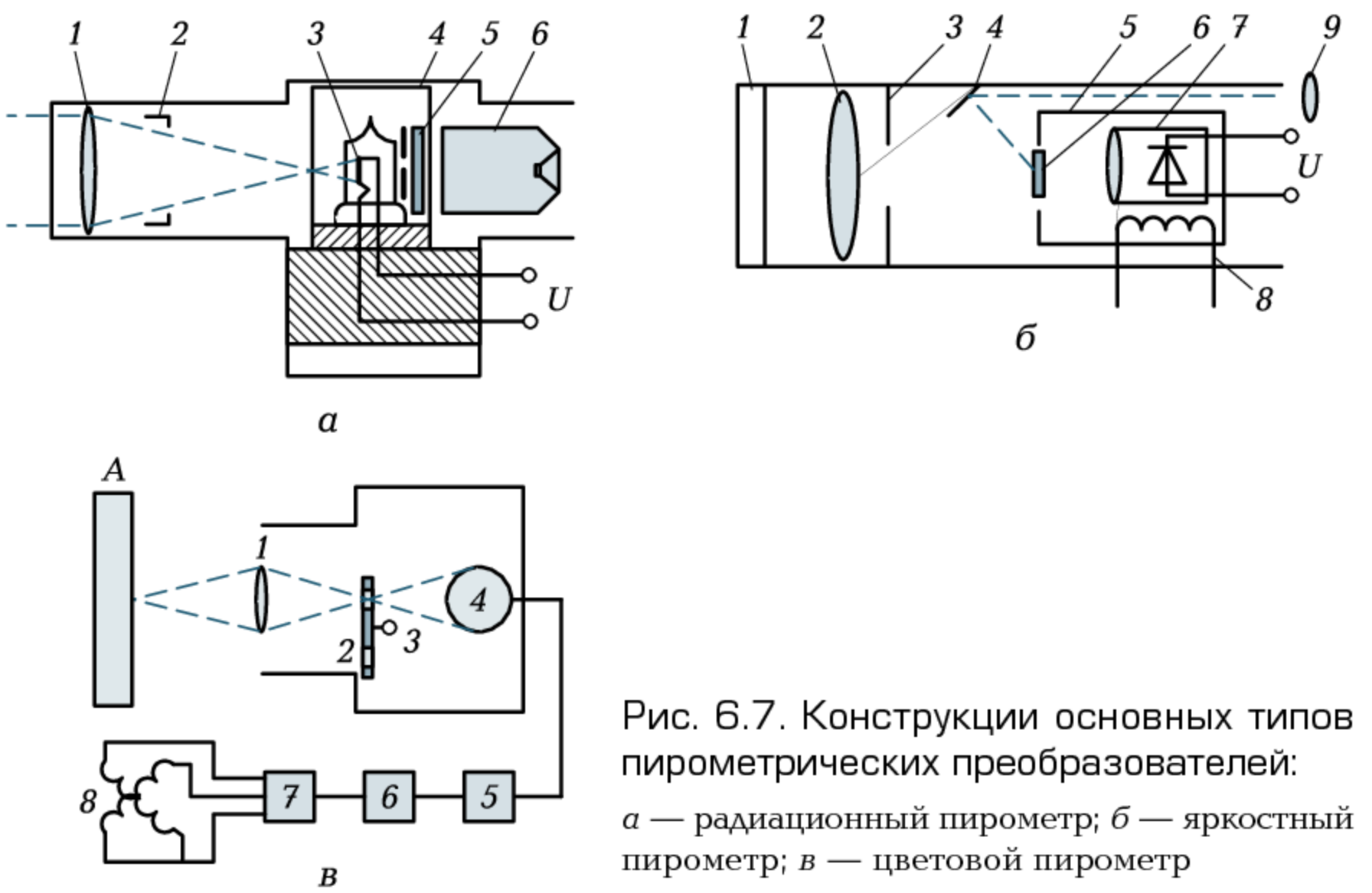


Рис. 6.7. Конструкции основных типов пирометрических преобразователей:

а — радиационный пирометр; *б* — яркостный пирометр; *в* — цветовой пирометр

в окуляре *6* виден лепесток, окруженный ярким сиянием раскаленной поверхности. Для правильной установки прибора отношение диаметра источника излучения к расстоянию от телескопа до излучателя должно быть примерно равно 1/15.

Максимальная температура нагрева лепестка составляет 250 °С, так как при более высоких температурах чернь коагулирует и становится серой. Предел измерения температуры таким пирометром равен 900... 1 800 °С.

Конструкция *яркостного пирометра* показана на рис. 6.7, *б*. Чувствительным элементом является фотодиод, работающий в генераторном режиме. Напряжение, генерируемое фотодиодом, пропорционально температуре поверхности.

Стекло *1* служит для защиты оптической системы *2* от загрязнений. Оптическая система предназначена для визирования изображения поверхности в плоскости фотодиода. Апертурной диафрагмой *3* осуществляется подгонка градуировочной характеристики пирометра. Приемное устройство состоит из фотодиода *7* и светофильтра *6*, который выделяет рабочую спектральную область работы фотодиода. Для наведения преобразователя на объект служит окуляр *9* и зеркало *4*.

Термостат *5* представляет собой двустенный цилиндр, между стенками которого проложена теплоизоляция (например, пенопласт). Постоянная температура в термостате поддерживается нагревателем *8*. Температура термостатирования, с учетом характеристик используемых фотодиодов, составляет 30 ... 50 °С. Наличие термостатирования позволяет устранить влияние температуры окружающего воздуха на показания пирометра.

Цветовые пирометры измеряют цветовую температуру. Раскаленное черное тело испускает лучи всех длин волн. При этом длина волны λ_{max}, соответствующая максимальному излучению при данной температуре, может быть найдена по формуле

$$\lambda_{max} T = \text{const} = 0{,}2884,$$

называемой законом смещения, который положен в основу измерения температуры цветовыми пирометрами. Абсолютная температура тела T определяется по длине волн, при которой имеет место максимум интенсивности излучения.

При промышленных измерениях температуры пирометрами принято определять отношение интенсивности излучения данного тела для двух заранее выбранных длин волн. Это отношение для каждой температуры будет различным и вполне однозначным и может служить критерием абсолютной температуры тела:

$$\frac{E_{\lambda 1}}{E_{\lambda 2}} = \frac{e^{-\frac{C_2}{\lambda_1 T}}}{e^{-\frac{C_2}{\lambda_2 T}}} = f(T).$$

Пирометры, измеряющие цветовую температуру, применяют, как правило, с фотоэлементами. Рассмотрим принцип их действия (рис. 6.7, *в*).

Излучение от объекта измерения *A* фокусируется линзой *1* на обтюраторе *2*, приводимом во вращение синхронным электродвигателем *3*, и затем воспринимается фотоэлементом *4*.

На диске обтюратора имеется ряд отверстий, половина которых закрыта красным светофильтром $СФ_к$, а половина — синим $СФ_с$.

Таким образом, на фотоэлемент попадают то красные, то синие лучи. Благодаря наличию нескольких отверстий фототок оказывается промодулированным с несущей частотой, определяемой числом отверстий в обтюраторе и скоростью его вращения.

Модулированный ток в нагрузке фотоэлемента усиливается усилителем *5*, а затем выпрямляется фазочувствительным выпрямительным узлом *6*, после чего с помощью коммутатора *7* сигнал разделяется соответственно интенсивности красных и синих лучей и воспринимается магнитоэлектрическим логометром *8*. В одной рамке логометра будет протекать ток, обусловленный интенсивностью красных лучей, а в другой — ток, обусловленный интенсивностью синих лучей в объекте излучения.

Так как цветовые пирометры измеряют функцию отношения интенсивностей излучения двух длин волн, погрешность уменьшается из-за неполноты излучения и независимости показаний от расстояния до излучающей поверхности и размеров последней. При надлежащем режиме работы фотоэлемента фотоэлектрические цветовые пирометры могут обеспечить измерение температуры до 2 500 °С с погрешностью не более ±1 %.

Измерение расхода жидкости (газа). В технологических процессах многих отраслей промышленности одним из важнейших параметров является расход протекающего по трубопроводу вещества (жидкость, газ). Точный контроль, регулирование или учет этого параметра дает возможность воздействовать на ход процесса, а следовательно, и на качество конечного продукта.

В соответствии с ГОСТ 8.563.1—97 под *расходом* понимается физическая величина, равная переделу отношения приращения массы (объема) или количества жидкости (газа), протекающих в трубопроводе через сечение, перпендикулярное направлению скорости потока, к интервалу времени, за которое это прира-

щение произошло, при неограниченном уменьшении интервала времени.

Различают объемный и массовый расходы, которые связаны между собой через плотность вещества. В СИ основной единицей объемного расхода является м^3/с, а массового — кг/с. При технических измерениях часто применяют единицы м^3/ч и кг/ч.

Измерительный прибор, служащий для измерения расхода вещества, называется ***расходомером***, а прибор для измерения объема (массы) — ***счетчиком***. В каждом конкретном случае к этим терминам следует добавлять наименование контролируемой среды (например, расходомер жидкости, счетчик жидкости).

Наибольшее распространение получили следующие разновидности р а с х о д о м е р о в:

- *расходомеры обтекания* — основаны на зависимости положения чувствительного элемента, воспринимающего динамическое давление потока, от расхода;
- *тахометрические* — реализуют зависимость скорости движения чувствительного элемента расходомера, установленного в потоке, от расхода;
- *электромагнитные* — используют зависимость взаимодействия электропроводящей среды с магнитным полем от расхода;
- *ультразвуковые* — применяют зависимость частоты колебаний от расхода;
- *вихревые* — принцип работы связан с зависимостью частоты колебаний при вихреобразовании в потоке от расхода;
- *тепловые* — преобразуют с помощью теплового преобразователя скорость потока в температуру и используют зависимость этой температуры от расхода;
- *оптические с лазерным преобразователем* — реализуют зависимость скорости прохождения светового пучка от расхода среды;
- *ионизационные* — используют искусственную ионизацию потока среды и измеряют ионизационный ток, значение которого зависит от расхода среды;
- *меточные* — основаны на зависимости времени прохождения искусственно созданной внутри потока метки участка трубопровода от расхода.

Измерение расхода жидкости (газа) осуществляется следующими п р и е м а м и:

- *методом переменного перепада давления*, основанном на зависимости величины перепада статического давления на сужающем устройстве от расхода;

- *методом переменного уровня*, принцип работы которого основан на зависимости уровня в расходомере при свободном истечении среды через отверстие от расхода.

Измерение расхода по перепаду давления в сужающем устройстве реализует зависимость перепада давления в неподвижном сужающем устройстве, устанавливаемом в трубопроводе, от расхода измеряемой среды.

Это устройство следует рассматривать как первичный преобразователь расхода. Создаваемый в сужающем устройстве перепад давления измеряется дифференциальным манометром (дифманометром), который по линии связи соединяется с вторичным прибором, градуированным в единицах расхода.

Принцип измерения заключается в том, что при протекании потока через отверстие сужающего устройства повышается его скорость по сравнению со скоростью до сужения. Увеличение скорости, а следовательно, и кинетической энергии вызывает уменьшение потенциальной энергии и соответственно статического давления. Расход может быть определен по перепаду давления, измеренному дифманометром в соответствии с градуировочной характеристикой. На рис. 6.8 показан характер потока, распределение скорости v и статического давления $p_{ст}$ при установке в трубопроводе сужающего устройства — диафрагмы.

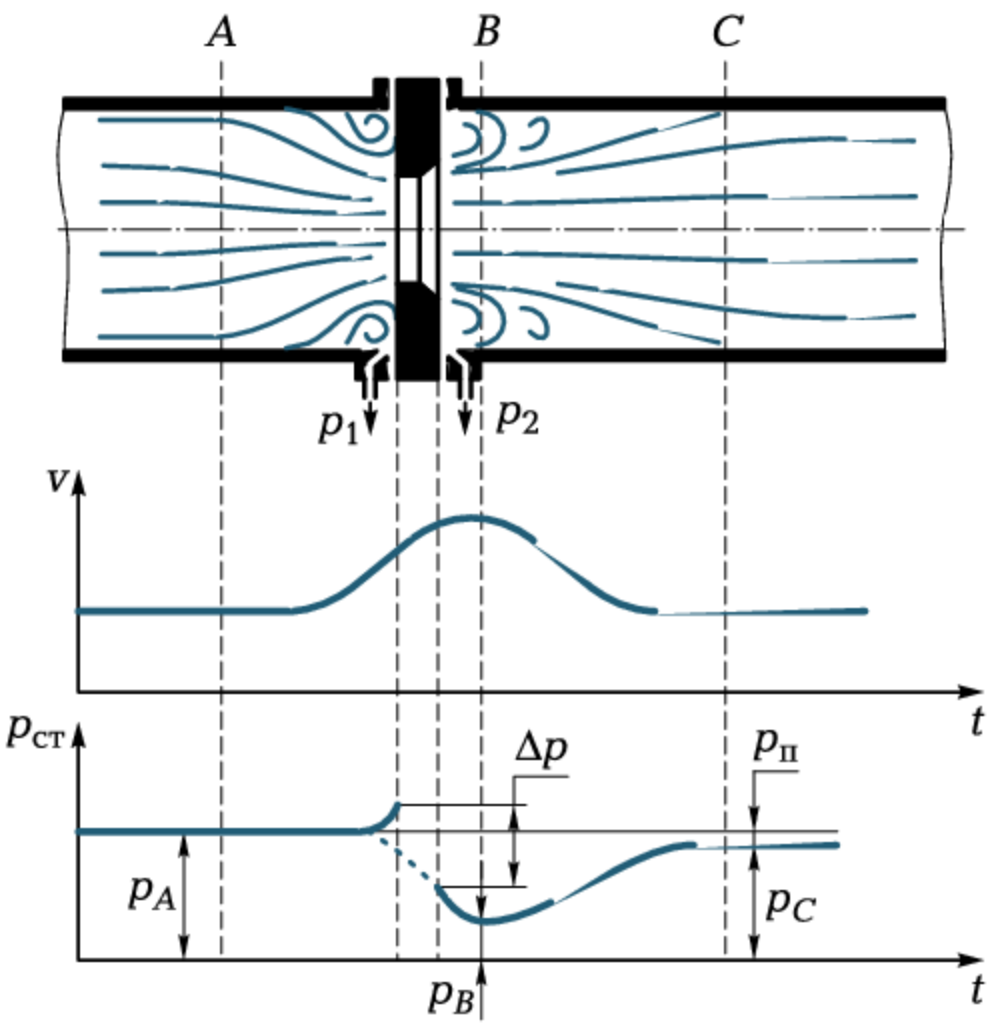


Рис. 6.8. Характер потока, распределение скорости и статического давления при установке в трубопроводе сужающего устройства — диафрагмы

Для выравнивания распределения скоростей по сечению трубопровода, неравномерность которого обусловлена наличием местных сопротивлений, применяют прямые участки трубопроводов определенной длины.

Влияние шероховатости на значение коэффициента истечения невозможно исключить подобным конструктивным путем, поэтому оно корректируется с помощью поправочного коэффициента на шероховатость внутренней поверхности трубопровода.

В качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкостей (газа, пара) используются диафрагмы, сопла и значительно реже сопла Вентури. (Наименьшие потери имеет сопло Вентури.)

При выборе конкретного сужающего устройства руководствуются потерями давления, вызываемыми сужающим устройством. Между расходом и перепадом давления существует квадратичная зависимость. Для получения равномерной шкалы расходомера в кинематическую и электрическую схемы дифманометров или вторичных приборов включаются различные типы устройств, извлекающих квадратный корень. Наличие таких устройств — один из недостатков метода измерения расхода по перепаду давления.

Другим серьезным недостатком метода является суженный диапазон измерения каждого конкретного расходомера, — обычно 30 ... 100 % наибольшего измеряемого расхода. Точность расходомера гарантируется только в этих пределах.

Основная погрешность расходомеров переменного перепада давления составляет 1 ... 4 %.

Измерение расхода методом постоянного перепада давления производится с помощью специальных расходомеров, называемых *ротаметрами*, принцип действия которых основан на зависимости вертикального перемещения поплавка, изменяющего площадь проходного сечения трубки таким образом, что перепад давления по обе стороны поплавка остается постоянным, от расхода жидкости (газа).

Применяют два типа р о т а м е т р о в:

- показывающие;
- с электрической или пневматической передачей показаний на расстояние.

В простейшем виде ротаметр представляет собой вертикальную коническую (расходящуюся вверх) стеклянную трубку *1*, внутри которой располагается поплавок *2* (рис. 6.9).

Поплавки могут иметь различную форму, например цилиндрическую с нижней конической частью и верхним бортиком с вырезанными на нем косыми канавками. Контролируемая среда

при протекании через канавки обеспечивает вращение поплавка, при этом он центрируется по оси трубки, что позволяет устранить трение о стенки.

Рассмотрим силы, действующие на поплавок, имеющий объем V, наибольшее сечение f, среднюю плотность $\rho_п$. Сверху вниз на поплавок действует сила тяжести $G = V\rho_п g$ (g — ускорение свободного падения). Снизу вверх на поплавок действует сила, обусловленная разностью статических давлений до и после поплавка $p_1 - p_2$, возникающая вследствие потока в кольцевом зазоре между стенкой и поплавком, $F = (p_1 - p_2)f$.

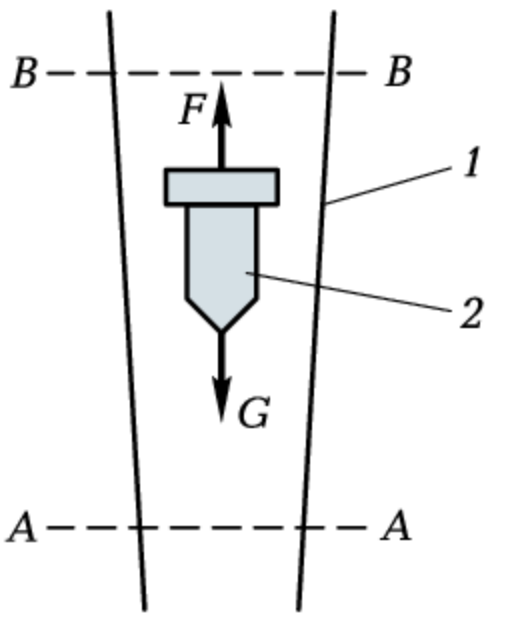


Рис. 6.9. Схема простейшего ротаметра

Поплавок будет неподвижно висеть в потоке жидкости (газа), при соблюдении равновесия сил, действующих на него снизу и сверху, т. е. $G = F$ или $p_1 - p_2 = G/f$.

При увеличении расхода жидкости q положение поплавка и кольцевого зазора $f_к$ между стенками трубки и поплавком неизменны, в силу чего $p_1 - p_2$ начнет увеличиваться, при этом нарушится равенство и поплавок начнет подниматься вверх. Также будет увеличиваться $f_к$ (из-за конусного профиля трубки), что приведет к уменьшению $p_1 - p_2$. Подъем поплавка будет осуществляться до тех пор, пока вновь не восстановится равенство сил. Очевидно, что любому расходу будет соответствовать определенная площадь $f_к$ кольцевого зазора, т. е. определенное положение поплавка. Уравнение, связывающее q_0 и $f_к$, обычно записывается в виде, аналогичном уравнению расхода для расходомеров переменного перепада давления (α — коэффициент расхода ротаметра):

$$q_0 = \alpha f_k \sqrt{2qV(\rho_п - \rho) / (\rho f)}.$$

Из формулы следует, что зависимость между q_0 контролируемым расходом вещества и $f_к$ при $\alpha = \text{const}$ близка к линейной. Коэффициент расхода ротаметров зависит от многих факторов (числа Re, формы поплавка) и не поддается аналитическому определению. В связи с этим ротаметры градуируются экспериментально. На положение поплавка влияет плотность контролируемой среды, т. е. градуировка ротаметра должна производиться с ее учетом.

При использовании ротаметров для других сред показания нужно умножать на поправочный множитель K. Если вязкости измеряемой и градуировочной среды близки, то

$$K = \sqrt{\frac{\rho_{гр}(\rho_{п} - \rho)}{\rho(\rho_{п} - \rho_{гр})}},$$

где $\rho_{гр}$ и ρ — градуировочная и действительная плотность среды; $\rho_{п}$ — плотность материала поплавка.

Обычно для газов $\rho \ll \rho_{п}$, и в этом случае $K = \sqrt{\rho_{гр}/\rho}$.

Переградуировку ротаметра осуществляют изменением $\rho_{п}$, например, применяя пустотелый поплавок или поплавок из другого материала.

Для ротаметров характерно то, что наименьший измеряемый расход q_{min} равен 0,1 ... 0,2 от наибольшего расхода q_{max}. Погрешность измерения ротаметрами составляет ±1,5; ±2,5 и может быть уменьшена в два-три раза индивидуальной градуировкой.

Показывающие ротаметры конструктивно состоят из стеклянной трубки, на которую нанесена шкала, а показания отсчитываются визуально по положению верхней части поплавка. Такие ротаметры применяют для измерения расхода газа или прозрачных жидкостей при давлении не выше 0,6 МПа, с пределами измерений 2,5 ... 3 000 л/ч (для воды) и 0,063 ... 40 м^3/ч (для газа) и основной погрешностью ±1,5 %.

Ротаметры с дистанционной передачей показаний (бесшкальные) изготовляют с металлической трубкой из латуни или нержавеющей стали. Они предназначены для измерения расхода при давлении до 6,4 МПа. Для передачи информации о расходе служит дифференциально-трансформаторный преобразователь, плунжер которого перемещается вместе с поплавком. Выпускают ротаметры типа РЭ с пределами измерения 0,025 ... 63 м^3/ч (для воды) и основной погрешностью ±2,5 %. В качестве вторичного прибора используется Диск-250.

Ротаметры обладают рядом достоинств: простотой устройства, возможностью измерения малых расходов и на трубопроводах малых диаметров, практически равномерной шкалой.

Недостатки ротаметров заключаются в необходимости установки только на вертикальных участках трубопроводов, возможности измерения только плавноменяющихся расходов слабозагрязненных сред.

Измерение расхода по динамическому давлению основано на зависимости динамического давления от скорости потока измеряемой среды.

По уравнению Бернулли разность между полным $p_{п}$ и статическим $p_{ст}$ давлением равна динамическому давлению $p_{д}$ (рис. 6.10):

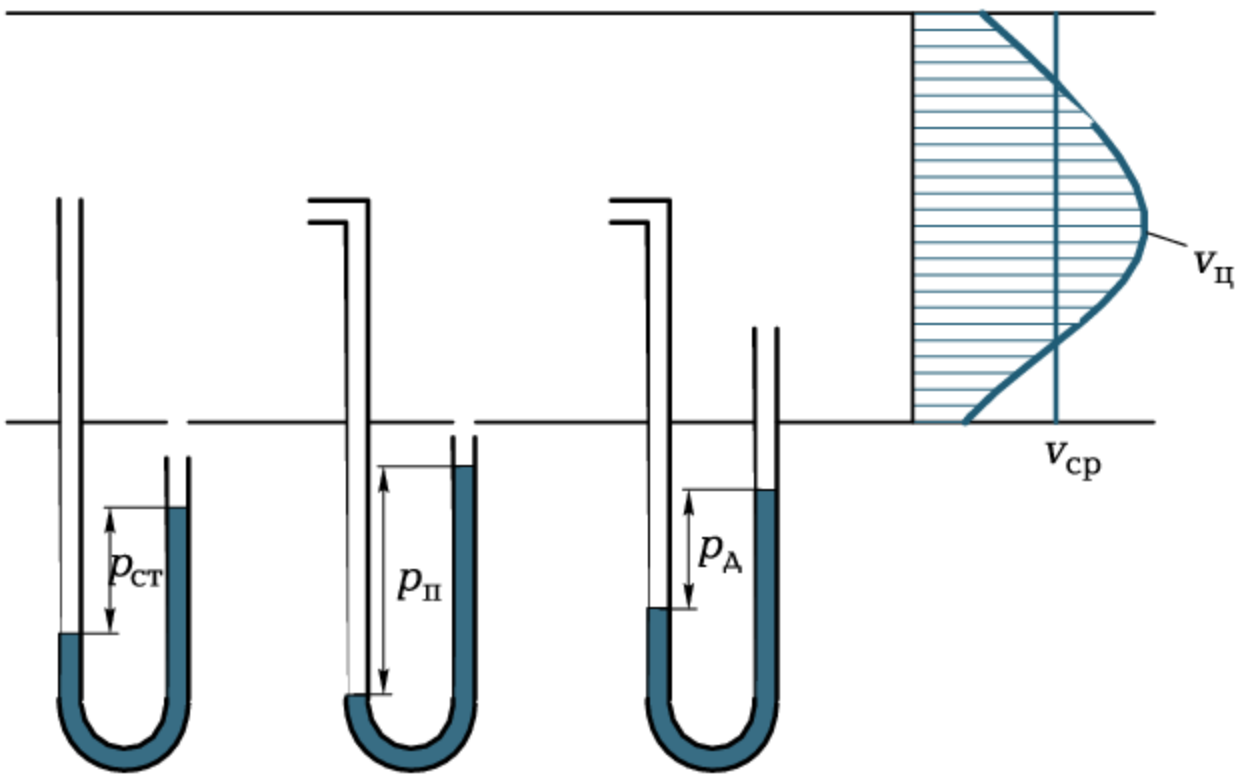


Рис. 6.10. Схема измерения динамического напора потока: $p_п = p_с + p_д$ — полное давление потока; $p_{ст}$ — статическое давление потока; $p_д$ — динамическое давление потока; $v_ц$ — скорость в центре потока; $v_{ср}$ — средняя скорость

$$p_д = p_п - p_{ст} = \frac{\rho v^2}{2}, \tag{6.1}$$

где v — линейная скорость потока, м/с; ρ — плотность среды, кг/м^3.

Из выражения (6.1) следует, что

$$v = \sqrt{2(p_п - p_{ст})/\rho} = \sqrt{2p_д / \rho}, \tag{6.2}$$

а расход (S — площадь проходного сечения трубопровода):

$$q_0 = v_{ср} S. \tag{6.3}$$

Динамическое давление измеряется скоростными (напорными) трубками (трубками Пито) в комплекте с дифференциальными манометрами.

Напорные трубки, установленные вдоль оси трубопровода, измеряют скорость в центре потока $v_ц$, которая всегда больше средней скорости. Отношение скоростей $v_ц/v_{ср}$ зависит от числа Рейнольдса — Re. Эти зависимости, приводимые в технических справочниках, используются для измерения расхода жидкостей и газов в трубопроводах больших диаметров и при больших скоростях потоков, а также в трубопроводах некруглого сечения.

Измерение давления жидкостей (газов) с помощью тензометрических преобразователей. В современных электрических датчиках давления используются различные методы измерения.

В мировой практике приборостроения применяют электрические датчики давления, основанные на пьезорезистивном, емкостном, резонансном и других методах. Но наибольшее распространение получили тензометрические датчики с применением полупроводниковых и тонкопленочных металлических тензочувствительных схем, что в значительной мере обусловлено бурным развитием тонкопленочной и микроэлектронной техники. Такие датчики выпускают фирмы США, Франции, Великобритании, Японии и России («НИИТеплоприбор»).

Использование тензорезисторного метода измерения позволяет создавать приборы с простейшей кинематикой или практически без нее, малой массой подвижных элементов, малогабаритными упругими элементами, работающими в режиме малых перемещений.

Суть тензорезисторного метода измерения применительно к датчикам давления заключается в непосредственном преобразовании деформации упругого манометрического элемента или связанного с ним упругого силового элемента в изменение электрического сопротивления тензорезисторов, закрепленных на одном из указанных элементов. Это изменение сопротивления тензорезисторов преобразуется электрической измерительной схемой в выходной сигнал для дистанционной передачи.

Рассмотрим несколько наиболее часто используемых датчиков давления фирмы Метран.

Датчики давления Метран-22 предназначены для непрерывного преобразования значения измеряемого параметра — давления избыточного (ДИ), абсолютного (ДА), разрежения (ДВ), давления-разрежения (ДИВ), разности давлений (ДД) нейтральных и агрессивных сред, а также газообразного кислорода и обогащенного кислородом воздуха в унифицированный выходной токовый сигнал дистанционной передачи.

Датчик состоит из преобразователя давления (измерительного блока) и электронного преобразователя (аналогового или микропроцессорного).

Принцип работы датчика заключается в следующем. Измеряемый параметр подается в камеру измерительного блока и преобразуется в деформацию чувствительного элемента, вызывая при этом изменение электрического сопротивления тензорезисторов тензопреобразователя, размещенного в измерительном блоке.

Чувствительным элементом тензопреобразователя является пластина из монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами (структура КНС), прочно соединенная с металлической мембраной тензопреобразователя.

Электронный преобразователь датчика преобразует изменение сопротивления моста тензопреобразователя в токовый выходной сигнал.

Схема датчика Метран-22 ДИ модели 2130 приведена на рис. 6.11.

Тензопреобразователь *4* мембранно-рычажного типа размещен внутри основания *9* и замкнутой полости *11*, заполненной кремний-органической жидкостью (для датчиков кислородного исполнения используется жидкость ПЭФ-70/110), и отделен от измеряемой среды металлическими гофрированными мембранами *8*. Мембраны приварены по наружному контуру к основанию *9* и соединены между собой центральным штоком, который связан с концом рычага тензопреобразователя с помощью тяги *5*. Другой конец тяги связан со штоком *6*, переходящим в диски с гофрированной поверхностью. Фланцы *10* уплотнены прокладками *3*. Камера *12* сообщается с окружающей атмосферой. Воздействие измеряемой разности давлений (большее давление подается в камеру *7*, меньшее — в камеру *12*) вызывает прогиб мембраны *8*, изгиб мембраны тензопреобразователя и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается из измерительного блока в электронный преобразователь *1* по проводам через гермоввод *2*. Измерительный блок выдерживает без разрушения кратковременное воздействие односторонней перегрузки

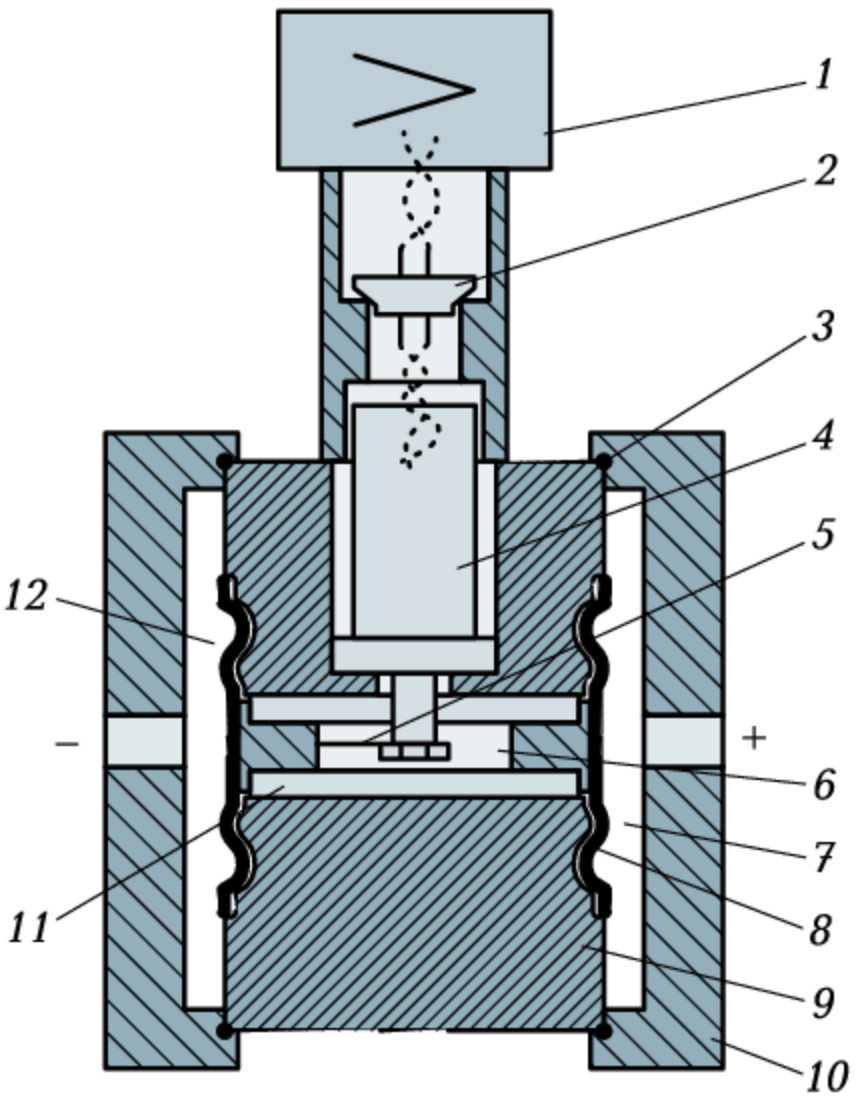


Рис. 6.11. Схема датчика Метран-22 модели 2130

рабочим избыточным давлением. Это обеспечивается тем, что при такой перегрузке одна из мембран *8* ложится на профилированную поверхность основания *9*.

***Интеллектуальные датчики давления Метран-100* (*150*)** (рис. 6.12, *а*) предназначены для работы в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами и обеспечивают непрерывное преобразование в унифицированный аналоговый токовый сигнал дистанционной передачи,

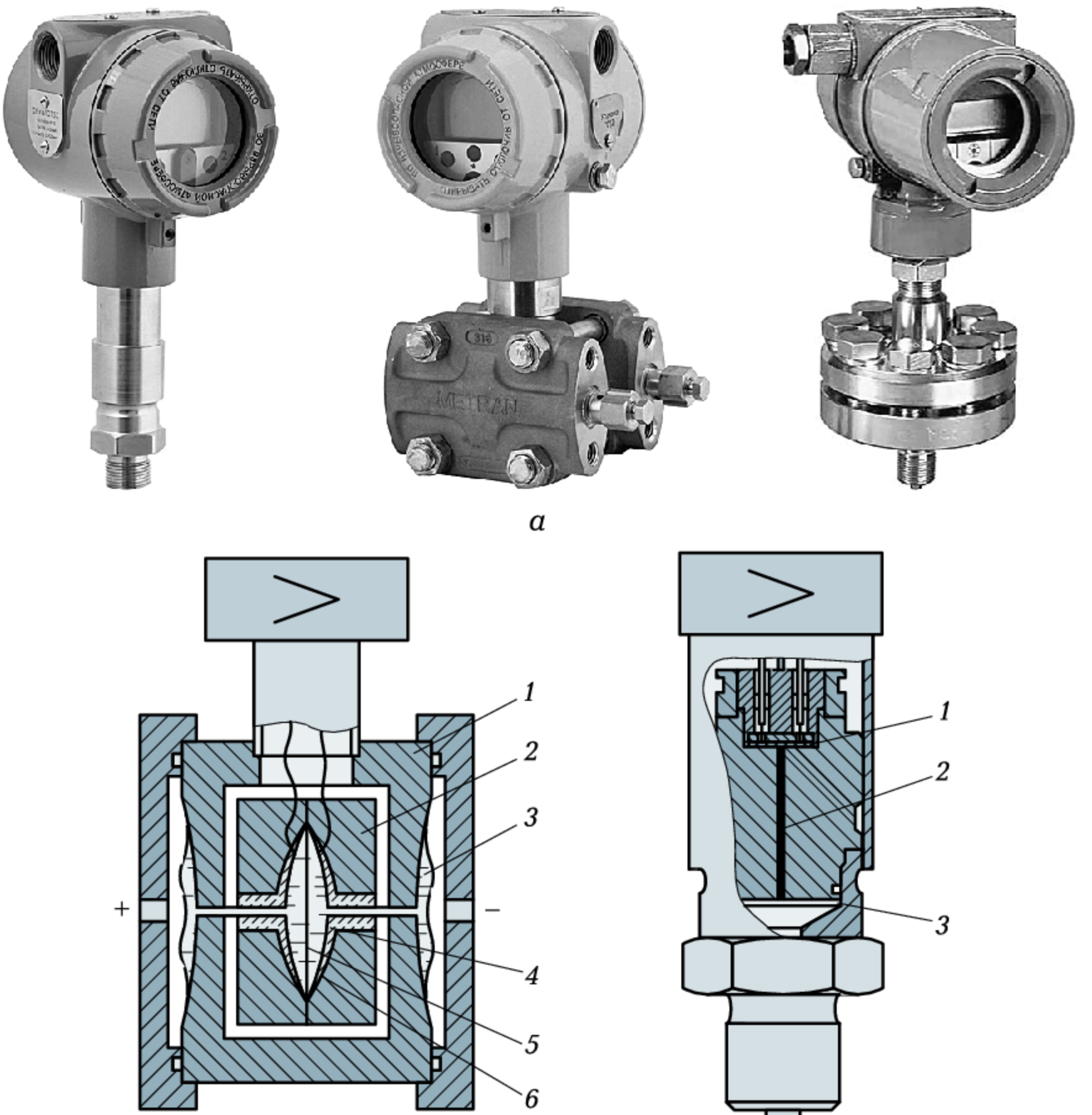


Рис. 6.12. Интеллектуальные датчики Метран-100(150):

а — общий вид; *б* — схема датчиков Метран-150 моделей 150CD и 150CG; *в* — то же 150TG, 150TA

или цифровой сигнал в стандарте протокола HART, или цифровой сигнал на базе интерфейса PS485 избыточного давления (ДИ), абсолютного давления (ДА), разрежения (ДВ), давления-разрежения (ДИВ), разности давлений (ДД), гидростатического давления (ДГ).

Управление параметрами датчика осуществляется со встроенной панели с помощью кнопок, HART-коммуникатора с использованием программы ICP-Master и компьютера или программных средств АСУ ТП.

Датчики имеют встроенный фильтр радиопомех, внешнюю кнопку установки «0» и обладают свойством непрерывной самодиагностики. Измеряемые среды: жидкости, пар, газ, в том числе газообразный кислород и кислородосодержащие газовые смеси, пищевые продукты. Диапазоны измеряемых давлений: минимальный 0…0,04 кПа; максимальный 0…100 МПа. Основная погрешность измерений: до ±0,1 % от диапазона. Диапазон перенастроек пределов измерений: до 25:1.

Принцип действия датчика Метран-100 основан на использовании пьезорезистивного эффекта в гетероэпитаксиальной пленке кремния, выращенной на поверхности монокристаллической пластины из искусственного сапфира. Чувствительный элемент с монокристаллической структурой кремния на сапфире является основой всех сенсорных блоков датчиков семейства «Метран».

При деформации чувствительного элемента под воздействием входной измеряемой величины (например, разности давлений) изменяется электрическое сопротивление кремниевых тензорезисторов мостовой схемы на поверхности чувствительного элемента.

Датчики предназначены для работы с вторичной регистрирующей и показывающей аппаратурой, системами управления, воспринимающими стандартные сигналы постоянного тока 0…5 или 4…–20 мА или цифрового сигнала на базе HART-протокола.

В памяти сенсорного блока в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) хранятся в цифровом формате результаты калибровки сенсора во всем рабочем диапазоне давлений и температур. Эти данные используются микропроцессором (МП) для расчета коэффициентов коррекции выходного сигнала при работе датчика.

Цифровой сигнал с платы АЦП сенсорного блока вместе с коэффициентами коррекции поступает на вход электронного преобразователя, микроконтроллер которого производит коррекцию и линеаризацию характеристики сенсорного блока, вычисляет скорректированное значение выходного сигнала датчика и далее:

- для датчиков с кодами МП, МП1, МП2, МП3 передает его в цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), который преобразует его

в аналоговый выходной сигнал или цифровой в стандарте HART (коды МП2, МП3);

- для датчиков с кодами МП4, МП5 с помощью драйвера RS485 по запросу выдает значения давления (в заданном формате) в цифровую линию связи.

Для лучшего обзора жидкокристаллического индикатора (ЖКИ) и удобного доступа к двум отделениям электронного преобразователя последний может быть повернут относительно измерительного блока от установленного положения на угол не более 90° против часовой стрелки.

Датчик Метран-150 состоит из сенсора и электронного преобразователя.

Сенсор включает в себя измерительный блок и плату АЦП. Давление подается в камеру измерительного блока, преобразуется в деформацию чувствительного элемента и изменение электрического сигнала.

Электронный преобразователь преобразует электрический сигнал в соответствующий выходной сигнал.

Схема датчиков фланцевого исполнения моделей 150CD, 150CG представлена на рис. 6.12, *б*.

Измерительный блок датчиков состоит из корпуса *1* и емкостной измерительной ячейки *2*, которая изолирована механически, электрически и термически от измеряемой и окружающей сред. Измеряемое давление передается через разделительные мембраны *3* и разделительную жидкость *4* к измерительной мембране *5*, расположенной в центре емкостной ячейки.

Воздействие давления вызывает изменение положения измерительной мембраны, что приводит к появлению разности емкостей между измерительной мембраной и пластинами конденсатора *6*, расположенным по обеим сторонам от измерительной мембраны. Разность емкостей измеряется АЦП и преобразуется электронным преобразователем в соответствующий выходной сигнал.

Схема датчиков штуцерного исполнения моделей 150TG, 150TA представлена на рис. 6.12, *в*.

Измерительный блок датчиков состоит из тензорезистивного тензомодуля на кремниевой подложке, чувствительным элементом которого является кремниевая пластина *1* с пленочными тензорезисторами (структура КНК — кремний на кремнии).

Давление через разделительную мембрану *3* и разделительную жидкость *2* передается на чувствительный элемент тензомодуля. Воздействие давления вызывает деформацию чувствительного элемента, что приводит к изменению электрического сопротивления

его тензорезисторов и разбалансу мостовой схемы. Образующийся при этом электрический сигнал измеряется АЦП и подается в электронный преобразователь, где преобразуется в соответствующий выходной сигнал.

В модели 150ТА полость над чувствительным элементом вакуумирована и герметизирована.

Измерение уровня сыпучих материалов. Под *измерением уровня* понимается индикация положения раздела двух сред различной плотности относительно какой-либо горизонтальной плоскости, принятой за начало отсчета. Технические средства, применяемые для измерения уровня, называются уровнемерами. Приборы, предназначенные для сигнализации предельных уровней жидкостей (сыпучих материалов), называют сигнализаторами уровня.

Соответствие уровнемеров тем или иным требованиям позволяет произвести их разделение на определенные группы. Так, ГОСТ 28725—90 предусматривает разделение уровнемеров по следующим признакам:

- по виду используемой энергии (электрические, пневматические, комбинированные);
- защищенности от воздействия окружающей среды;
- стойкости к механическим воздействиям.

Приведенное разделение уровнемеров является скорее разделением по признакам конструктивного исполнения и не может помочь в выборе необходимого уровнемера, так как характеризует его вторичные свойства.

Основной следует считать классификацию уровнемеров по примененному методу измерения уровня, т. е. принципу действия. Методы измерения уровня группируются по тем физическим свойствам, различие которых у веществ, образующих поверхность раздела, положено в основу метода.

По принципу действия уровнемеры для сыпучих материалов подразделяют на шесть групп:

- использующие различие плотностей (массовый, радиоизотопный, гидростатический, буйковый, поплавковый);
- акустические (локационный, диссипативный, резонансный);
- тепловые (дилатометрический, терморезисторный, термоЭДС);
- оптические (фотоэлектрический, визуальный, преломления, поглощения, отражения);
- электромагнитные (кондуктометрический, индуктивный, емкостной, радиоволновый);
- механические (с гибким щупом, зондовый, маятниковый, с вращающимся телом, с колеблющимся телом).

Рассмотрим измерение уровня сыпучих материалов с помощью *зондового метода* (рис. 6.13).

Массивное тело *1* подвешено внутри сосуда с сыпучим материалом *2* на гибкой связи *3* (тросе или ленте). На валу реверсивного двигателя (РД1) закреплен барабан, наматывающий трос с грузом. Включение двигателя выполнено таким образом, что при ослабленном тросе (груз касается сыпучего материала) двигатель наматывает трос и начинает поднимать груз. В момент натяжения троса через коромысло *4* срабатывают контакты SL и двигатель РД1 ослабляет трос. В дальнейшем цикл повторяется. Таким образом, груз постоянно находится на поверхности сыпучего материала.

Двигатель РД1 связан кинематически с индикатором угла поворота (ИУФ) с ферродинамическим преобразователем (ПФ), сигнал с которого поступает на вторичный самопишущий прибор (ВФС).

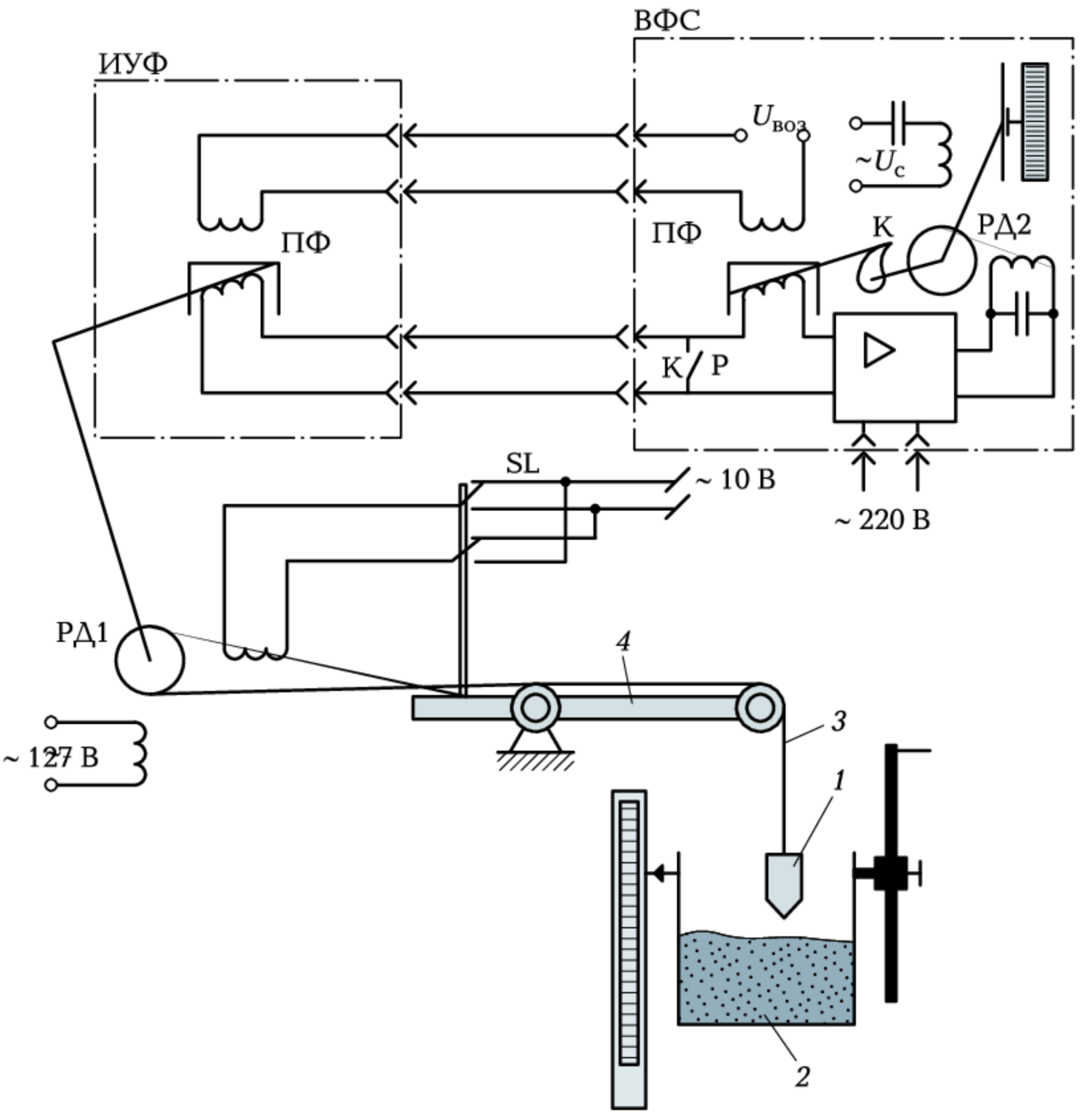


Рис. 6.13. Зондовый метод измерения уровня сыпучих материалов

При рассогласованном положении рамок преобразователей на вход усилителя будет подаваться разность напряжений $\Delta U = U_2 - U_1$. Сигнал баланса ΔU усиливается и приводит в действие реверсивный двигатель (РД2), выходной вал которого, кинематически соединенный с рамкой компенсирующего преобразователя и через профилирующий кулачок (К) — со стрелкой, вращает рамку до тех пор, пока ΔU напряжение баланса, уменьшаясь, не станет меньше порога чувствительности усилителя (контакты К/Р — контроль/работа).

При достижении полной компенсации ротор реверсивного двигателя остановится, а рамка преобразователя вторичного прибора и его стрелка займут положение, соответствующее углу поворота рамки преобразователя первичного прибора (ИУФ), а следовательно, и значению измеряемой величины. Шкала прибора градуирована в единицах измерения (мм).

Измерение уровня жидкостей. Уровнемеры широко применяют в различных отраслях промышленности для измерения уровня жидкостей, находящихся в резервуарах, баках и других устройствах.

По принципу действия приборы для измерения уровня жидкости подразделяют на пять групп:

- ***механические*** (поплавковые, буйковые);
- ***пьезометрические*** (гидростатические) (барботажные, манометрические);
- ***электрические*** (электроконтактные, емкостные, индуктивные, радиоволновые);
- ***акустические*** (локационные, диссипативные и резонансные). Чаще применяется локационный уровнемер, определяющий уровень по времени распространения ультразвуковых волн в измеряемой среде;
- ***радиоизотопные***.

Поплавковые уровнемеры имеют чувствительный элемент, находящийся на поверхности измеряемой жидкости и передающий значение уровня указателя с помощью мерной ленты или троса; в *буйковых* (поплавки с отрицательной плавучестью) *уровнемерах* в качестве чувствительного элемента используется буёк, связанный с компенсационным устройством, реагирующим на изменение массы буйка при изменении уровня погружения его в жидкость.

Барботажные уровнемеры представляют собой пневмометрическую трубку, имеющую выход для воздуха на фиксированном положении от дна резервуара. Уровень жидкости определяется по давлению воздуха, прокачиваемого по трубке; *манометрические*

уровнемеры определяют уровень по давлению пьезометрического столба жидкости, воспринимаемого манометром (дифференциальным манометром).

Принцип работы *электроконтактных уровнемеров* основан на измерении электрической проводимости измеряемых сред; *емкостные* используют различие диэлектрических свойств воздуха ($\varepsilon = 1$) и измеряемой жидкости (воды $\varepsilon = 81$); в *индуктивных* импеданс датчика уровня имеет индуктивный характер и меняется с изменением уровня жидкости из-за различия электрической проводимости жидкости и парогазовой смеси; *радиоволновые* основаны на зависимости какой-либо характеристики электромагнитного колебательного процесса от величины контролируемого уровня (радиолокационный, радиоинтерференционный, эндовибраторный и резонансный методы); *радиоизотопные* фиксируют поглощение измеряемой жидкостью γ-лучей, излучаемых радиоактивным излучателем (кобальт-60 или цезий-137).

6.3. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Исполнительный механизм (ИМ). Это устройства, предназначенные для перемещения регулирующего органа (РО) в системах автоматического регулирования или дистанционного управления, а также в качестве вспомогательного привода элементов следящих систем, рулевых устройств транспортных машин.

Исполнительные устройства (механизмы), или сервомоторы, получают сигнал от усилителя и формируют перестановочное усилие для привода в действие регулирующего органа.

По виду используемой энергии ИМ подразделяют на гидравлические, пневматические, электрические и комбинированные.

По характеру перемещения рабочего органа различают ИМ непрерывного и дискретного действия (открыто — закрыто), а также поступательного и вращательного движения.

Основными характеристиками ИМ являются: коэффициент усиления по мощности, скорость (постоянная или переменная) и усилие (перемещение) на выходе.

Конструктивно ИМ нередко исполняется в едином узле с усилителем, особенно в гидравлических и пневматических устройствах.

Среди ***электрических ИМ***, получивших наибольшее распространение в автоматике, следует назвать электрические двигатели и электромагнитные приводы.

Электромагнитные приводы применяют для приведения в действие регулирующих органов с поступательным движением затвора — клапанов, задвижек, золотников. *Электромагнитные сервомоторы* работают в релейном режиме (открыто — закрыто); наиболее распространен прямоходовой электромагнит с втягивающимся сердечником (соленоид).

По устройству и принципу действия *электрические двигатели* классифицируют на асинхронные, синхронные и коллекторные. Асинхронные и синхронные двигатели работают на переменном токе, коллекторные — на переменном или постоянном токе, а универсальные — на переменном и постоянном токе. Асинхронные двигатели применяют для приводов с регулируемой и постоянной частотой вращения, синхронные — для приводов с постоянной частотой вращения.

В автоматических системах регулирования широкое применение в качестве исполнительных механизмов находят ИМ с электродвигателями с постоянной частотой вращения выходного вала. Такие ИМ осуществляют перемещение регулирующего органа с постоянной скоростью, поэтому в литературе их называют исполнительными механизмами постоянной скорости.

Исполнительный механизм типа МЭО (механизм электрический однооборотный) — специализированный привод регулирующего органа. Он включает в себя двигатель с редуктором, концевые и путевые выключатели и датчики положения выходного вала. Исполнительный механизм постоянной скорости может находиться только в трех основных состояниях: 1) перемещение РО с постоянной скоростью v_0; 2) неподвижность; 3) перемещение РО в обратную сторону с постоянной скоростью. При достижении крайних положений вала срабатывают концевые выключатели и ИМ останавливается.

К однооборотным исполнительным механизмам относятся механизмы, угол поворота выходного вала которых не превышает 360°. Однооборотные ИМ работают с бесконтактными и контактными пусковыми устройствами.

Исполнительный механизм типа МЭО выпускается в нескольких модификациях, характеризуемых следующими величинами:

- $M_{кр}$ — номинальный крутящий момент на выходном валу, величину которого указывает изготовитель, кг · м или Н · м ($M_{кр}$ = 40, 100, 250, 630, 1 600, 4 000 Н · м);

- $T_{ИМ}$ — номинальное время движения выходного вала ИМ от минимума до максимума в пределах $\varphi_{ИМ}$, с ($T_{ИМ}$ = 10, 25, 63, 160 с);
- $\varphi_{ИМ}$ — номинальный полный ход выходного вала ИМ, доли одного оборота выходного вала ($\varphi_{ИМ}$ = 0,25; 0,63 об.).

Например, модификация МЭО 40/63-0,25 имеет такие параметры: $M_{кр}$ = 40 Н · м; $T_{ИМ}$ = 63 с; $\varphi_{ИМ}$ = 0,25 об.

Управление ИМ типа МЭО обычно осуществляется релейным регулятором, который может быть как контактного, так и бесконтактного типов (рис. 6.14). Без учета времени разгона и торможения статическая характеристика $d\mu/d\tau = f(Z)$ такого ИМ в комплекте с пусковым устройством без зоны возврата может быть записана в виде системы уравнений:

$$\frac{d\mu}{d\tau} = v_0 \text{ при } Z > \frac{\Delta_{нч}}{2};$$

$$\frac{d\mu}{d\tau} = 0 \text{ при } |Z| < \frac{\Delta_{нч}}{2};$$

$$\frac{d\mu}{d\tau} = -v_0 \text{ при } Z < -\frac{\Delta_{нч}}{2},$$

где $\Delta_{нч}$ — зона нечувствительности пускового устройства; $d\mu/d\tau$ — скорость перемещения РО; Z — сигнал на входе пускового устройства; μ — перемещение.

Статическая характеристика ИМ типа МЭО является существенной нелинейной. Ее нельзя линеаризовать с достаточной для практических расчетов точностью при различных диапазонах изменения входного сигнала Z.

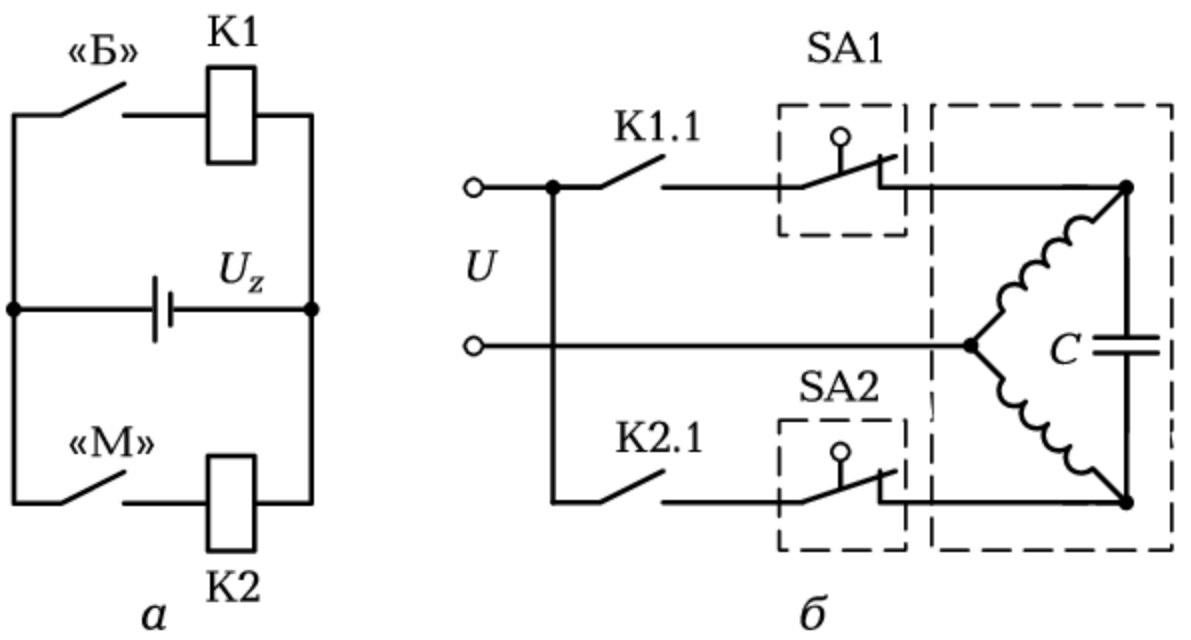


Рис. 6.14. Схемы управления ИМ с помощью электромагнитного пускового устройства (К1, К2 — электромагнитные реле; К1.1, К2.1 — контакты реле; «Б», «М» — сигналы перемещения вала ИМ «больше» и «меньше»):

а — контактная; *б* — бесконтактная

Однако такой ИМ может иметь достаточно близкие к линейным характеристики при релейно-импульсном изменении входного сигнала. Если подать на вход ИМ импульсы напряжения $Z_н$ с периодом следования $T_{пер}$ и скважностью:

$$\gamma = \frac{t_{имп}}{T_{пер}},$$

где $T_{пер} = t_{имп} + t_{пауз}$; $t_{имп}$ — длительность импульса; $t_{пауз}$ — длительность паузы.

Во время поступления импульса ИМ будет перемещаться с постоянной скоростью $v_0 = d\mu/d\tau = tg\alpha$, а во время пауз ИМ будет неподвижен (рис. 6.15).

Средняя скорость перемещения РО ($v_{ср}$) будет равна:

$$v_{ср} = tg\beta = \frac{t_{имп} v_0}{T_{пер}} = \gamma v_0.$$

Каждый импульс длительностью $t_{имп}$ вызывает поворот выходного вала механизма на некоторый угол $\Delta\varphi$. При воздействии на механизм последовательности импульсов выходной вал поворачивается на угол, равный сумме углов поворота, полученных от каждого импульса, т. е. ИМ является интегрирующим устройством.

Регулирующие органы. Это элементы в цепи воздействий, оказывающие непосредственное влияние на управляемый объект.

С помощью РО осуществляется изменение количества энергии (вещества), проходящей через объект. Таким образом, в функцию

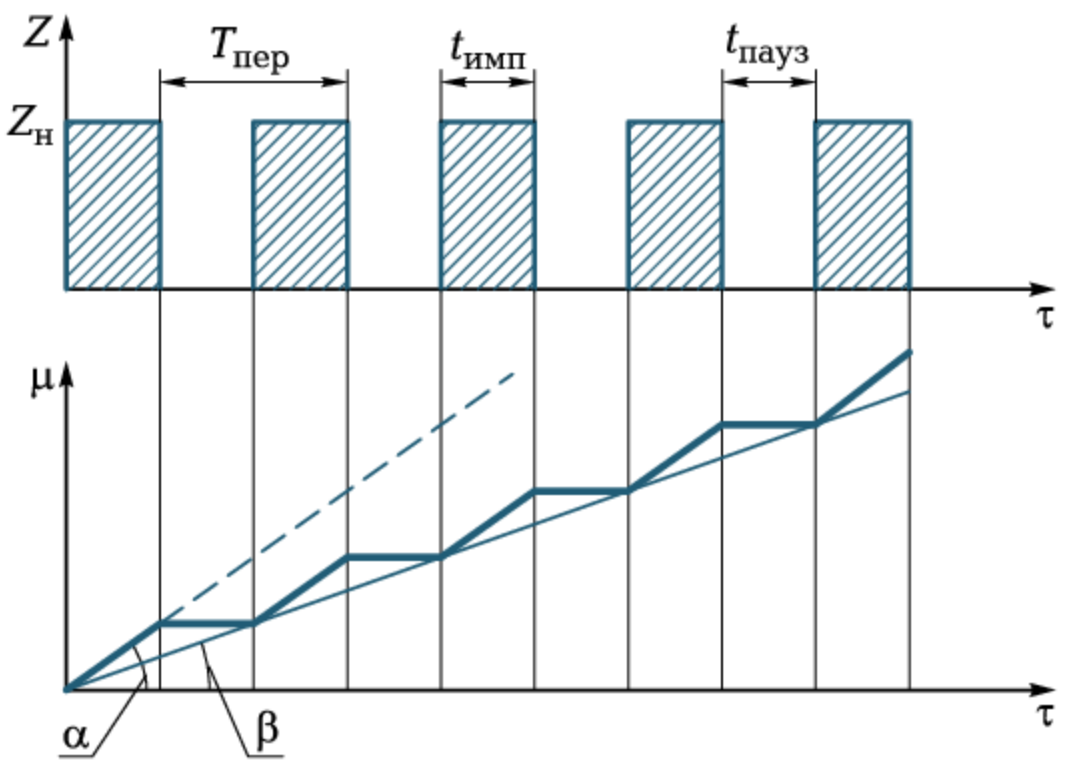


Рис. 6.15. Характер перемещения ИМ типа МЭО при поступлении на его вход серии постоянных импульсов

регулирующих органов входит изменение расхода различных рабочих сред.

По назначению РО подразделяют на запорные, дроссельно-регулирующие, предохранительные и специальные.

Дроссельными называют РО, которые перераспределяют потери давления как в магистрали, так и в самом органе. Потери давления, оставаясь постоянными, суммируются из различных составляющих в зависимости от степени открытия дроссели (расхода V).

По конструкции затвора (характеру перемещения подвижных элементов затвора) РО классифицируют: на арматуру с перемещением затвора параллельно потоку (клапаны и золотники), перпендикулярно к потоку (шиберные задвижки), с вращением затвора (поворотные заслонки, краны) и со сжатием проходного канала (шланговые и диафрагмовые клапаны).

Регулирующие органы для многих объектов технологических систем можно разделить на три группы:

- ***дроссельного типа***, изменяющие расход среды за счет изменения скорости и площади сечения потока при прохождении его через дросселирующее устройство, гидравлическое сопротивление которого является переменной величиной (клапаны, заслонки и шиберы);
- ***объемного типа***, в которых расход среды зависит от ее объема (например, дозирующие устройства);
- ***скоростного типа***, изменяющие производительность регулирующего устройства за счет скорости его вращения. К регулирующим органам этого типа относятся устройства регулирования частоты вращения первичных двигателей (паровых или электрических насосов, вентиляторов, дымососов и др.).

Дроссельные регулирующие клапаны служат для изменения расходов жидкости (пара, газа), транспортируемых по трубопроводам.

Существует несколько конструктивных разновидностей клапанов, различающихся формами плунжера *1* и седла *2* (рис. 6.16, *а* ... *g*).

Форма рабочих поверхностей имеет большое значение для работы РО. Она определяет характеристику РО, т. е. зависимость расхода вещества через РО от перемещения его затвора в рабочих условиях. У клапанов с гладкими рабочими поверхностями тарельчатого типа, как правило, характеристика линейная, т. е. пропускная способность клапана пропорциональна ходу плунжера. У клапанов другого типа характеристика может подчиняться математическим законам (каким-либо кривым — парабола, логарифмическая кривая и т. д.).

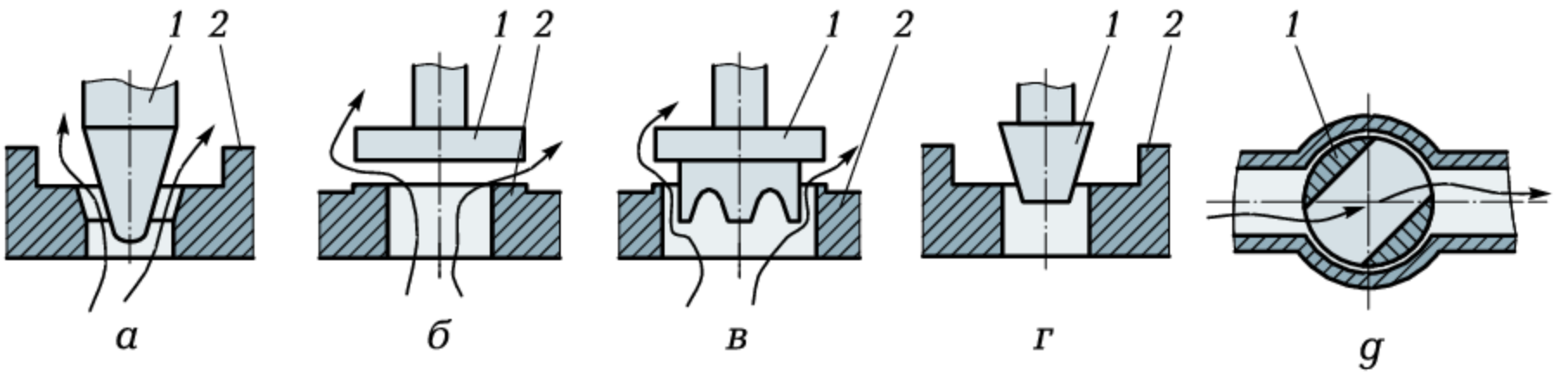


Рис. 6.16. Разновидности регулирующих органов:
а — игольчатый; *б* — тарельчатый; *в* — золотниковый; *г* — плунжерный; *д* — шаровой

Для трубопроводов круглого сечения применяют в основном ***поворотную регулирующую заслонку***, которая представляет собой диск, устанавливаемый в поперечном сечении трубопровода. Диск может поворачиваться вокруг оси, которая выводится из трубопровода через сальниковые уплотнители и опирается на подшипники.

Достоинства поворотных регулирующих заслонок заключаются в простоте конструкции, высокой надежности в работе; недостатком является невозможность обеспечения плотного закрывания, так как для свободного вращения заслонки между внутренней поверхностью трубопровода и заслонкой оставляется зазор.

Поворотные заслонки обычно применяют в качестве запорно-регулирующей арматуры при небольших статических давлениях среды.

6.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОНТРОЛЛЕРЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Общие сведения. С начала 1950-х годов в промышленное производство начинают повсеместно внедряться системы регулирования, призванные обеспечить автоматическое ведение технологических процессов и снизить величину отклонения процесса от технологического регламента.

С усложнением технологического оборудования, внедрением новых процессов и технологий системы управления, построенные с использованием аналоговых и релейно-контакторных схем, перестали удовлетворять условиям надежности и безопасности работы технологического оборудования. Кроме того, разнообразие элементной базы значительно усложняло наладку и ремонт таких систем.

В настоящее время большинство контуров современных систем автоматического управления строится с использованием микропроцессорных управляющих контроллеров. Эти приборы, обладающие широкими функциональными возможностями, имеют не очень высокую стоимость и позволяют строить АСУ ТП как на небольших предприятиях для автоматизации локальных контуров управления, так и на предприятиях, технологические объекты которых занимают значительные площади и имеют сотни и тысячи контролируемых и регулируемых параметров.

Действия, выполняемые контроллерами над входными сигналами, и формирование выходных сигналов определяются программно, что дает возможность реализовывать различные законы управления и производить специальную обработку сигналов без привлечения дополнительных технических средств.

Совместимость микропроцессорных контроллеров с вычислительными средствами (в частности, с персональными ЭВМ) позволяет применять существующие программные средства для формирования управляющих воздействий и отображения информации о состоянии процесса. Все это делает АСУ ТП гибкой, более наглядной и легко управляемой.

В настоящее время получили распространение управляющие технологические контроллеры двух форм-факторов: моноблочные и модульные.

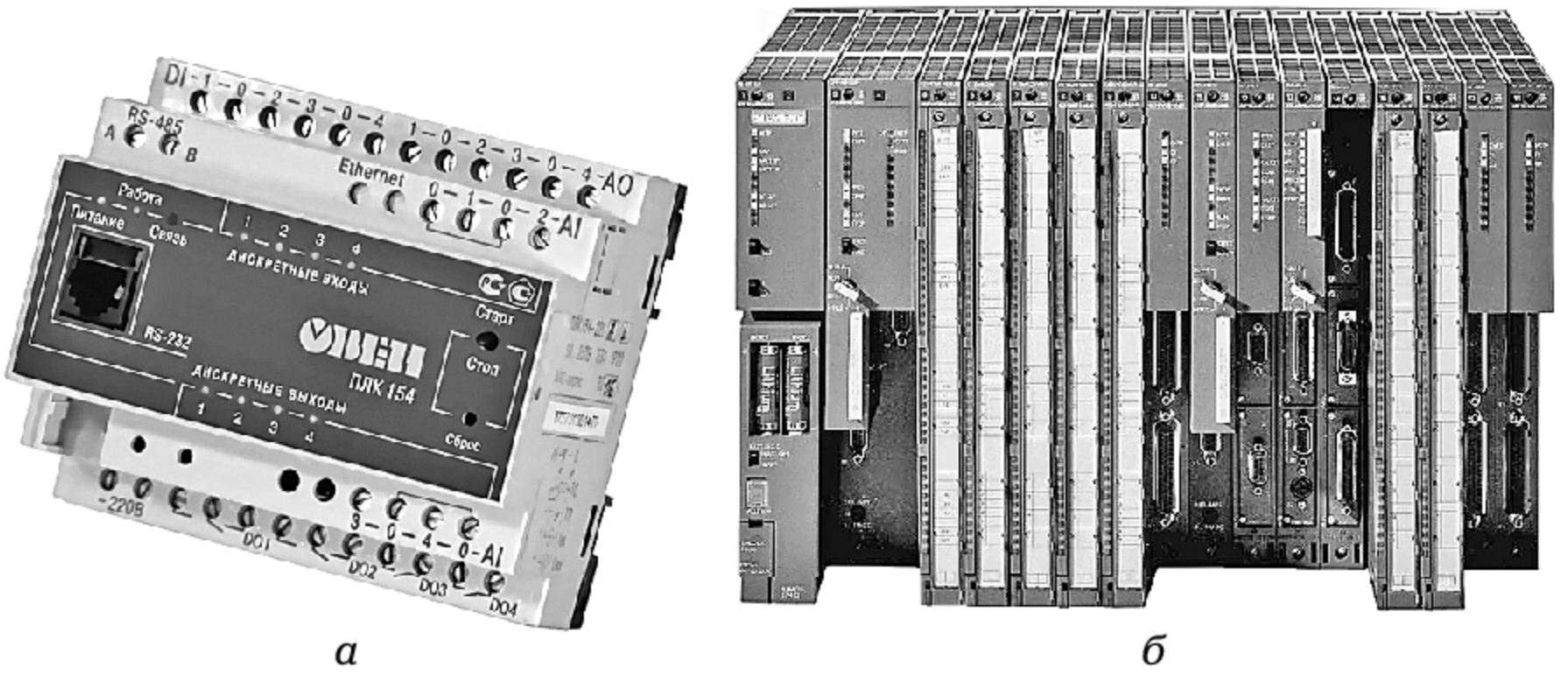
Моноблочные контроллеры представляют собой единый блок, внутри которого расположены все элементы контроллера: цепи питания, процессор, устройства ввода-вывода, сетевой интерфейс и т. д. (например, на рис. 6.17, *а* представлен программируемый логический контроллер (ПЛК) ОВЕН ПЛК154).

Технологические контроллеры данного типа предназначены для систем управления малыми и средними объектами, а также систем сбора данных в системах диспетчеризации.

Модульные контроллеры состоят из отдельных блоков модулей, соединяемых между собой специальными кабелями или шинами, которые могут выполняться в виде отдельных устройств или быть интегрированы в монтажную стойку, которая служит для расположения модулей.

В модульных контроллерах имеется возможность комбинировать модули, выбирая их тип в соответствии с решаемыми задачами, а также расширять выполняемые функции контроллера за счет замены или добавления новых модулей.

Наиболее известным типом модульных контроллеров являются контроллеры семейства Simatic 300/400, выпускаемые фирмой



а *б*

Рис. 6.17. Внешний вид технологических контроллеров:

а — моноблочный контроллер ОВЕН ПЛК154; *б* — модульный контроллер S7-400

Siemens (рис. 6.17, *б*). Рассмотрим структуру и состав технологического контроллера на примере этого типа контроллеров. В качестве примера выберем технологические контроллеры семейства Simatic S7-300/400.

Аппаратные средства контроллеров Simatic S7-300/400. В семейство контроллеров Simatic S7-300/400 входят контроллеры серий S7-300 и S7-400.

Серия программируемых контроллеров S7-300 предназначена для решения задач автоматического управления средней степени сложности с быстрой обработкой оперативной информации; серия контроллеров S7-400 решает задачи автоматического управления средней и высокой степени сложности. Контроллеры данной серии обладают наименьшим временем цикла обработки информации.

В табл. 6.1 приведены основные сравнительные характеристики процессорных устройств некоторых моделей серий S7-200, S7-300 и S7-400.

Отличие в сериях состоит в скорости выполнения операций процессорным блоком и объеме хранимой и обрабатываемой информации. Языки и технология программирования для всех серий одинаковы.

Несмотря на конструктивные различия серий, контроллеры имеют унифицированный интерфейс чтения и формирования электрических сигналов устройства связи с объектом (УСО), схему подключения, протокол передачи цифровых данных и язык технологического программирования STEP 7.

Таблица 6.1. Основные сравнительные характеристики процессорных устройств некоторых моделей серий S7-200/300/400

Наименование параметра	Тип процессора		
	CPU 212	CPU 315-2DP	CPU 412-2DP
Объем памяти программ и данных, кб	1,5	64	144
Время выполнения 1 000 логических команд, мс	1,2	0,3...0,6	0,2
Количество счетчиков	64	64	256
Количество таймеров	64	128	256
Количество дискретных входов/выходов	До 78	До 1 024	До 4 096
Количество аналоговых входов/выходов	До 8	До 128	До 256
Коммуникационный интерфейс	PPI	MPI + DP	MPI + DP

Система модулей включает в свой состав следующие компоненты:

- стойки (*Racks*) — служат для размещения, крепления модулей и соединения их между собой посредством шинных соединителей;
- источники питания (*Power Supply*, PS) — обеспечивают подачу электроэнергии к внутренним устройствам и модулям;
- центральное процессорное устройство (*Central Processing Unit*, CPU) — хранит и обрабатывает программу пользователя;
- интерфейсные модули (*Interface Modules*, IM) — соединяют стойку с расположенными на ней модулями с другой стойкой, т. е. служат для расширения количества модулей контроллера или создания сетевой структуры;
- сигнальные модули (*Signal Modules*, SM) — предназначены для приема или формирования аналоговых и дискретных сигналов и обеспечения их связи с системной шиной контроллера. Сигнальные модули, в свою очередь, подразделяют на модули дискретного ввода (SM DI — *discrete input*), дискретного вывода (SM DO — *discrete output*), аналогового ввода (SM AI — *analog input*) и аналогового вывода (SM AO — *analog output*);

- функциональные модули (*Function Modules*, FM) — выполняют сложную или критичную по времени обработку сигналов независимо от процессорного модуля, например счетчик импульсов, быстродействующий ПИД-регулятор и т. д.;
- коммуникационные процессоры (*Communications Processors*, CP) — устанавливают соединения со вспомогательными сетями (подсетями) или для обмена данными между контроллерами по промышленной сети PROFIBUS;
- подсети (*Subnets*) — соединяют программируемые контроллеры как друг с другом, так и с другими устройствами в системах управления уровня контроллеров, полевого уровня и уровня HMI;
- шинные соединители — предназначены для организации системной шины для передачи команд и данных между отдельными модулями;
- шинные кабели — служат для связи между отдельными стойками контроллера.

Стойка с размещенным на ней процессорным модулем является центральной. В ней могут располагаться до 8 модулей ввода-вывода (сигнальных модулей) для контроллеров S7-300 и до 9(18) — для контроллеров серии S7-400.

Если одной стойки недостаточно для размещения всех модулей контроллера, используются дополнительные стойки — стойки расширения, которые представляют собой набор требуемых модулей, соединенных посредством шинных соединителей и имеющих отдельный источник питания. Для контроллеров серии S7-300 максимальное количество стоек расширения составляет 3, для контроллеров серии S7-400 — до 21. Соединение стоек между собой осуществляется с использованием интерфейсных модулей, соединенных, в свою очередь, с помощью шин. На рис. 6.18 показана структура модульной конфигурации для контроллеров S7-300/400.

Максимальное расстояние между стойками зависит от типа используемых интерфейсных модулей и составляет от 1 до 600 м.

При необходимости создания сложной структуры с удалением стоек более чем на 600 м используются станции распределенной периферии, например ET-200M с интерфейсным модулем IM 153-3. В этом случае передача данных между удаленными станциями и процессорным модулем осуществляется по сети PROFIBUS-DP. Общее количество удаленных станций ввода-вывода может достигать 127 во всей сети. Длина кабеля в одном сегменте сети зависит от скорости передачи данных и составляет 100 м для скорости

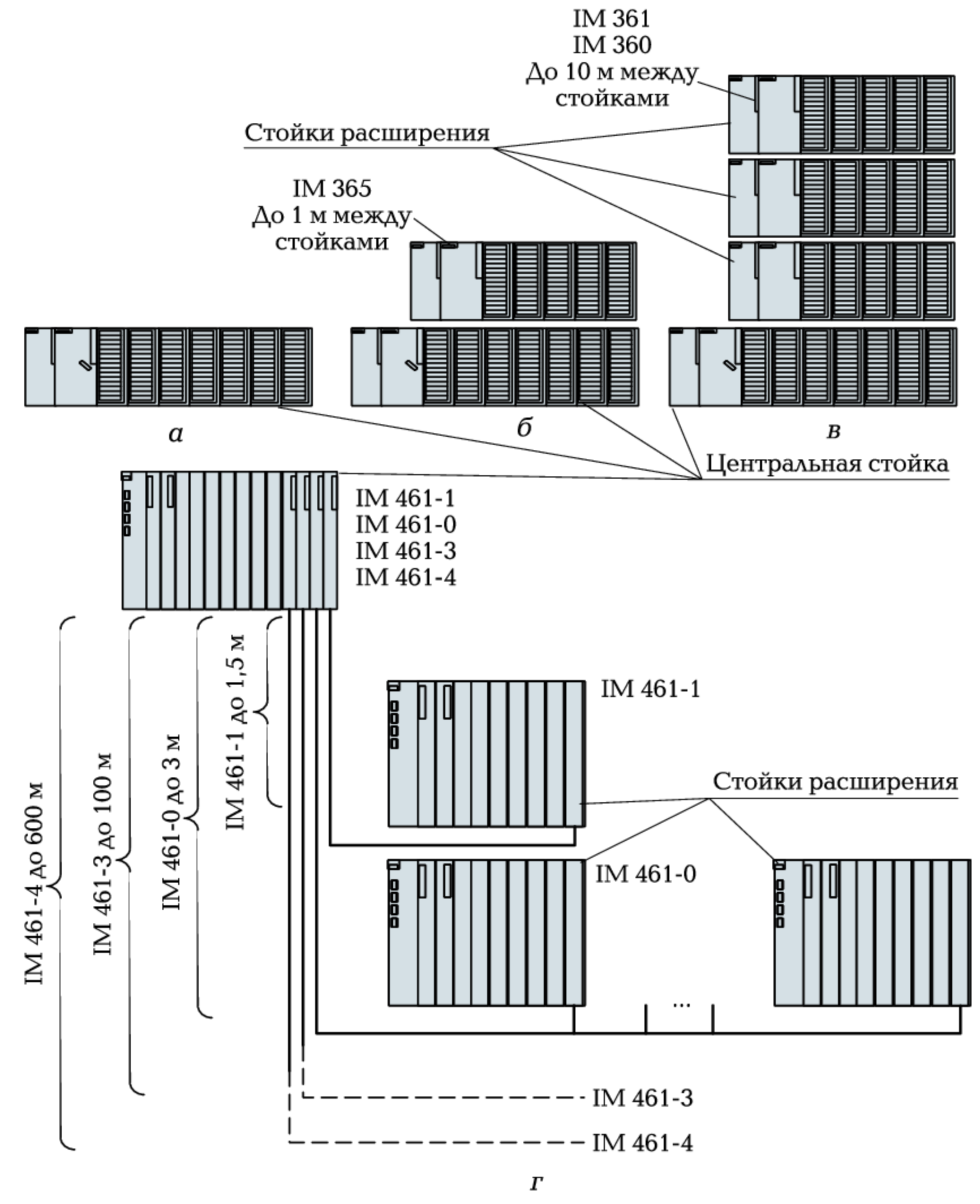


Рис. 6.18. Модульная конфигурация контроллеров S7-300/400:

а — одноуровневая S7-300; *б* — двухуровневая S7-300; *в* — четырехуровневая S7-300; *г* — модульная S7-400

12 Мбит/с и 1 000 м — для 9,6 кбит/с. Длину сети можно увеличить с помощью повторителей или оптических модулей связи.

Вне зависимости от структуры контроллера принцип его комплектации модулями, правила конфигурирования и программирования остаются неизменными.

В общем случае контроллер с любой конфигурацией модулей и типами соединений можно представить в виде структурной схемы (рис. 6.19), включающей *стойку* 0 — центральную стойку, которая содержит процессорное устройство и является ведущим устройством для всех остальных стоек; стойку 1 и стойку 2. Соединение отдельных модулей между собой осуществляется посредством двух шин, физически расположенных в шинных соединителях: P-шина (шина ввода-вывода или периферийная шина) служит для передачи сигналов между процессорным модулем и модулями ввода-вывода. По ней передаются сигналы с датчиков на исполнительные устройства, подключенные непосредственно к сигнальным модулям; K-шина (коммуникационная шина) связывает процессорный модуль, интерфейс устройства программирования (MPI) с функциональными модулями и коммуникационными процессорами. Шина обеспечивает управление модулями и передачу сигналов в подсети.

Интерфейсные модули выполняют функции устройства для передачи сигналов между стойками с обеих шин, представляя их в соответствующем протоколе передачи данных при передаче сигнала и производящего обратное преобразование при приеме. Так как подобные преобразования проводятся на уровне модулей, при

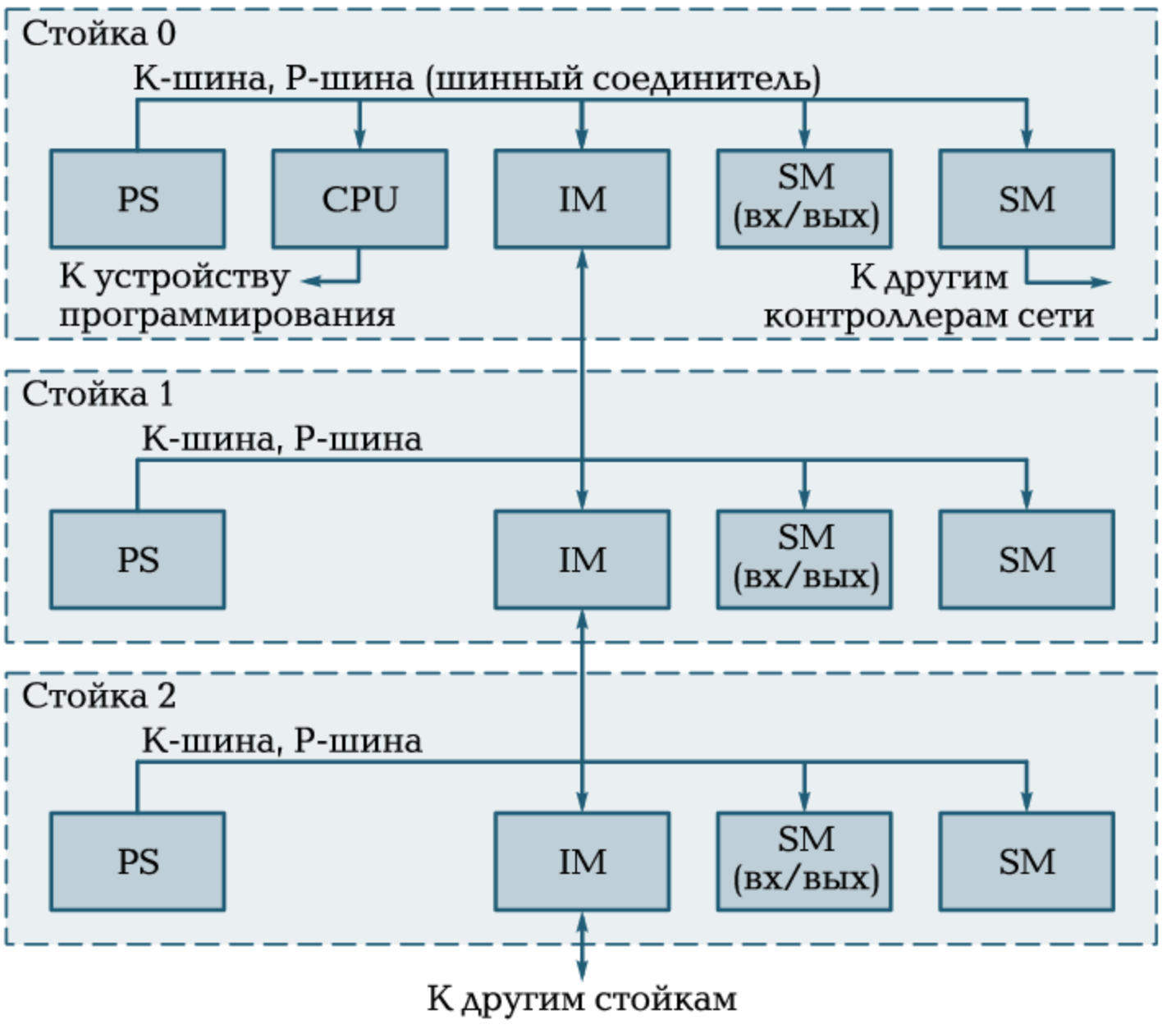


Рис. 6.19. Структурная схема контроллеров Simatic S7-300/400

программном конфигурировании аппаратной части указывается только тип соединения отдельных стоек между собой. При этом используется сквозная адресация всех модулей контроллера, которая не зависит от используемой структуры, а зависит только от типов модулей контроллера. Таким образом, при программировании контроллера не важно, как соединены отдельные стойки контроллера, поскольку программирование ведется уже на уровне адресов устройств и модулей.

Виртуальная структура процессорного модуля. Процессорный модуль представляет собой микропроцессорное устройство с программным выполнением команд. Система команд и принцип выполнения программы спроектированы с расчетом выполнения программ по управлению технологическими процессами с необходимой для таких целей надежностью и точностью.

Для снижения требований к уровню подготовки специалистов по технологическому программированию и обслуживанию микропроцессорного контроллера в целом процессорный модуль содержит средства виртуализации, представляющие собой элементы микропроцессорного контроллера в виде, традиционном для автоматизированных систем управления. Виртуальное представление происходит на внутреннем программном уровне процессорного модуля, который недоступен со стороны пользователя.

Такой подход традиционен для микропроцессорных систем управления технологическими процессами. Пользователю предоставляется структура, позволяющая ставить и решать задачи по АСУ ТП, причем пользователь оперирует терминами и понятиями, традиционными для САУ в целом.

Основными элементами процессорного модуля, которые представляются пользователю в виде виртуальной структуры, являются:

- распределение памяти процессорного модуля;
- циклическое выполнение управляющей программы;
- команды языка программирования STEP 7.

Распределение памяти в процессорном модуле можно представить в виде схемы (рис. 6.20).

Вся область памяти, доступная пользователю, делится на загрузочную, рабочую и системную память. Каждая область памяти физически изолирована от других областей. Как правило, для реализации областей памяти используются запоминающие устройства различных типов.

Загрузочная память энергонезависимая, используется для хранения программы во время выключения процессора и реализуется

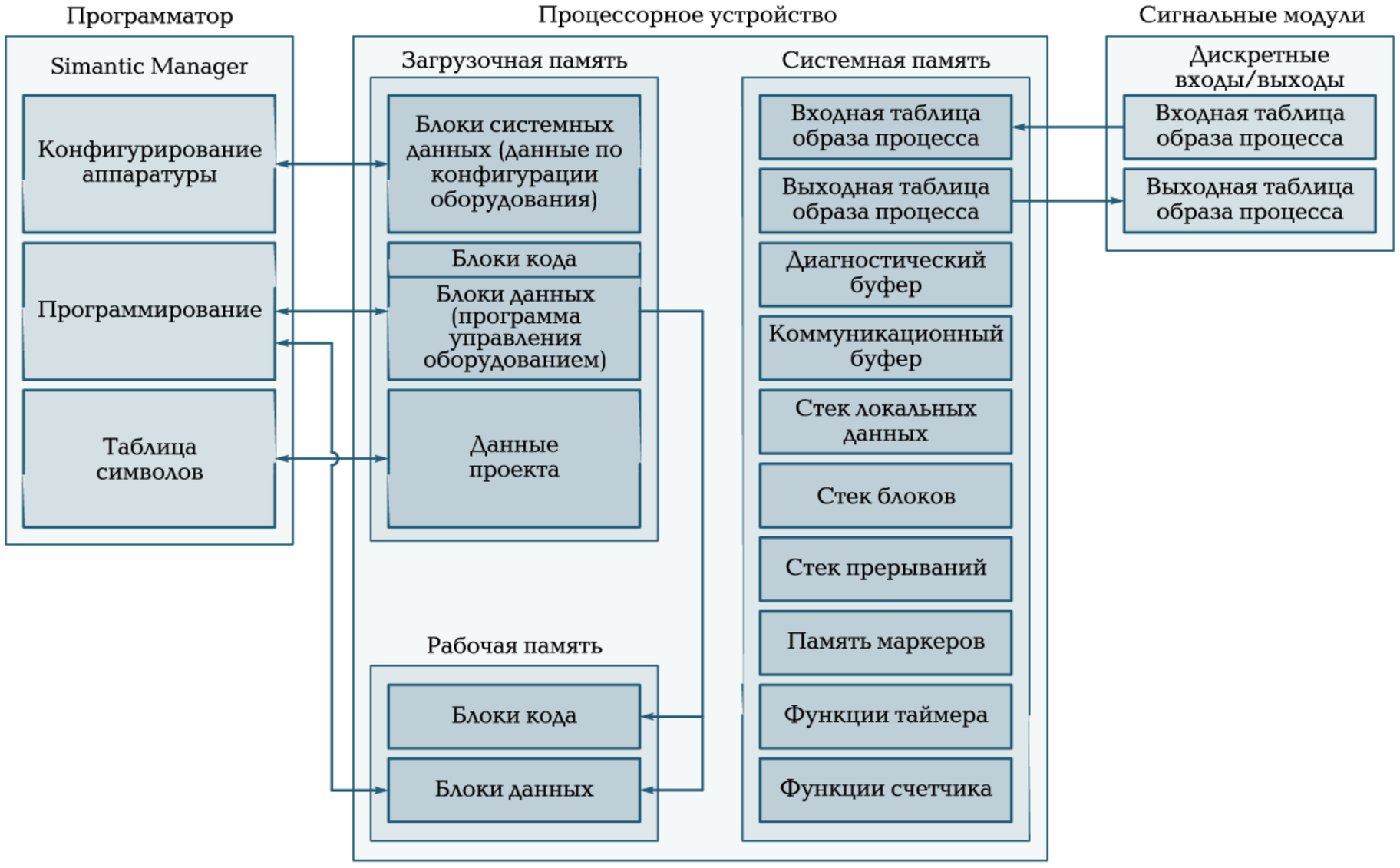


Рис. 6.20. Распределение областей памяти процессорного модуля

с использованием электрически перепрограммируемых постоянных запоминающих устройств (ЭППЗУ). Загрузочная память может быть интегрированной в процессорный модуль или подключаемой (*plugin*), при использовании внешней карты памяти.

Рабочая память представляет собой оперативное запоминающее устройство, расположенное на плате процессора и, как правило, не имеет средств, обеспечивающих энергонезависимость. Рабочая память содержит исполняемый процессором код и необходимые для работы данные.

Рабочая управляющая программа находится в двух областях — загрузочной памяти (*load memory*) и рабочей памяти (*work memory*).

Программирующее устройство (программатор) переносит всю программу, включая данные конфигурации аппаратуры, в загрузочную память. Затем операционная система процессорного модуля копирует программный код и пользовательские данные в рабочую память, где и происходит выполнение кода процессором модуля. При обратной загрузке программы в программирующее устройство выбранные из загрузочной памяти блоки дополняются текущими значениями данных из рабочей памяти.

Системная память обычно выполняется как энергонезависимая, что обеспечивается использованием как резервных источников питания, так и «быстрых» ЭППЗУ. Она содержит физические адреса (переменные), к которым обращается программа. Адреса объединены в области (области адресов). Объем каждой области адресов определяется процессорным модулем при конфигурировании аппаратуры.

Системная память процессорного модуля содержит следующие области адресов:

- входы (*Inputs*, I) — отображение данных с модулей дискретного входа;
- выходы (*Outputs*, O) — отображение передаваемых данных на модули дискретного выхода;
- память маркеров (*Bit memory*, M) — промежуточные данные рабочей программы;
- таймеры (*Timers*, T) — ячейки памяти, используемые для реализации интервалов ожидания;
- счетчики (*Counters*, C) — организуемые на программном уровне ячейки памяти, используемые для ведения счета по возрастанию и убыванию;
- временны́е локальные данные (*Temporary local data*, L) — ячейки памяти, используемые в качестве промежуточной во время

обработки блока программы; расположены в L-стеке, который динамически используется процессором во время выполнения программы.

Буквы, указанные в скобках после названия, применяются для различных областей адресов при написании программы. Также в программе можно присвоить символическое имя каждой переменной и затем использовать его вместо идентификатора адреса.

Системная память содержит также служебные области адресов для подготовки передаваемых пакетов данных по сетям (коммуникационный буфер) и системных сообщений (диагностический буфер).

Программное обеспечение процессорного блока состоит из операционной системы (*operating system*) и пользовательской программы (*user program*).

Операционная система — это совокупность всех инструкций и описаний, которые осуществляют управление системными ресурсами и процессами, использующими эти ресурсы. Она включает в себя такие функции, как резервирование данных в случае сбоя электропитания, активация приоритетных классов и т. д. Операционная система является неотъемлемым компонентом процессора. У пользователя нет прямого доступа к функциям операционной системы (доступ производится через системные блоки).

На уровне операционной системы организуется циклическое выполнение управляющей программы.

Пользовательская программа представляет собой совокупность всех инструкций и описаний для обработки сигналов, с помощью которых осуществляется управление процессом в соответствии с определенной задачей автоматизации.

В общем случае пользовательская программа состоит из программных разделов, которые могут обрабатываться процессором в зависимости от определенных событий. Таким событием может быть запуск системы автоматизации, прерывание или обнаружение программной ошибки.

По порядку выполнения программных разделов, предназначенных для обработки событий, программы подразделяют по приоритетным классам (*priority classes*). При одновременном возникновении нескольких событий сначала начинают выполняться программные разделы, имеющие высший приоритетный класс, и т. д.

Программой с низшим приоритетом является главная программа (*main program*), которая обрабатывается процессором циклически. Какие-либо внешние события могут прервать главную программу в любом месте, после чего процессор выполнит связанный с этим

прерыванием программный раздел и вернет управление главной программе.

Каждому событию соответствует специальный организационный блок (*organization block*, OB) — часть программы пользователя, которая реализует механизм приоритетных классов. При возникновении события процессор активизирует назначенный этому событию организационный блок.

Главная программа располагается в организационном блоке OB1, который всегда обрабатывается центральным процессором. По завершении обработки OB1 (конец программы) процессор передает управление операционной системе, и после вызова различных функций операционной системы (таких, как обновление образа процесса) центральный процессор снова вызывает OB1.

Процесс выполнения программы представлен на рис. 6.21.

Событиями, которые могут изменять работу программы, являются прерывания (*interrupts*) и ошибки (*errors*).

Источником прерываний может быть как непосредственно процесс управления (аппаратные прерывания), так и процессор (циклические прерывания — *watchdog interrupts*, прерывания по времени суток — *time-of-day interrupts* и др.).

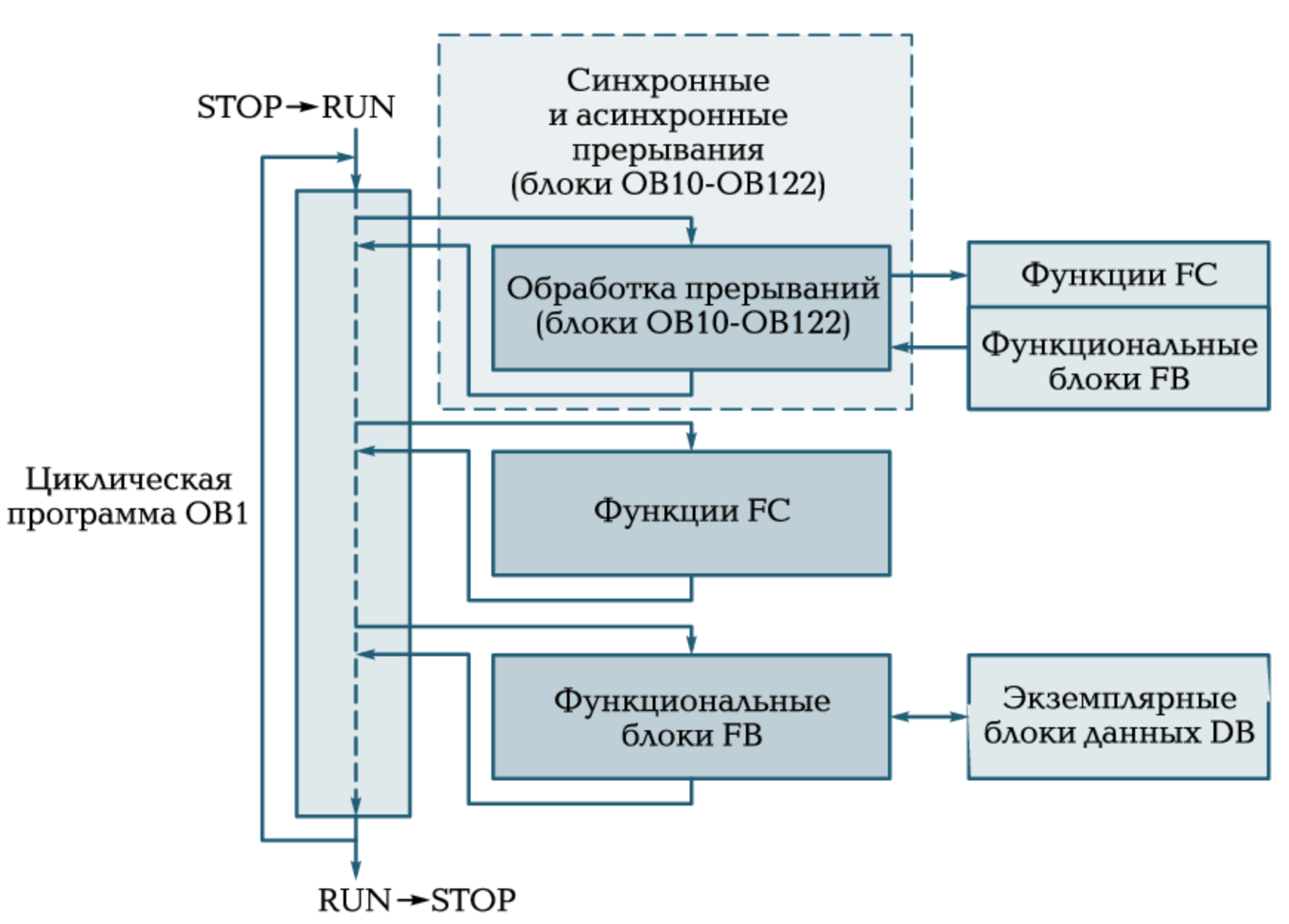


Рис. 6.21. Упрощенная схема процесса обработки пользовательской программы (FC — Functions; FB — Function blocks)

Различают синхронные и асинхронные ошибки. Асинхронной является ошибка, которая не зависит от выполнения программы (например, отказ электропитания в устройстве расширения или замена модуля). Синхронные ошибки возникают при выполнении программы (например, обращение к несуществующему адресу или ошибка преобразования типа данных).

Типы и номера обрабатываемых событий и соответствующих организационных блоков определяются типом процессора; не каждый тип процессора способен обработать все возможные события.

Программные блоки процессорного модуля. В целях повышения удобочитаемости и понимания программу можно разбить на произвольное число разделов. При этом каждая часть программы (раздел) должна быть независима и выполнять законченную процедуру управления технологическим объектом. Такие разделы программы называют блоками (*blocks*), каждый из которых обладает собственной функциональностью, структурой и областью решаемых задач.

В зависимости от решаемых задач различают следующие типы блоков:

- пользовательские блоки (*user blocks*) — содержат пользовательскую программу и пользовательские данные и полностью программируются пользователем;
- системные блоки (*system blocks*) — содержат системную программу и системные данные и являются промежуточным буфером для обращения к функциям операционной системы;
- стандартные блоки (*standard blocks*) — готовы к непосредственному использованию (созданы заранее), например блоки управления функциональными модулями и коммуникационными процессорами (блоки ПИД-регулирования, счетчики, блоки передачи данных и т. д.).

Пользовательские блоки в свою очередь подразделяют на следующие типы:

- *функциональные блоки* (*Function blocks*, FB) — часть программы (или подпрограммы). У функциональных блоков имеется область памяти для хранения констант и переменных, используемых в этом функциональном блоке (*variable memory*), которая располагается в блоке данных (DB). Этот блок постоянно связан с функциональным блоком. С одним функциональным блоком может быть связано несколько блоков данных с такой же структурой, но содержащих другие значения. Такой блок данных называют *экземплярным блоком данных* (*instance data block*), а совокупность вызова функционального блока и экземплярного

блока данных — *экземпляром вызова* (*call instance*), или просто *экземпляром* (*instance*);

- *функции* (*Functions*, FC) — используются для программирования часто повторяющихся или сложных функций автоматизации. Для них могут быть определены параметры, которые передаются в функцию каждый раз при ее вызове. Функции могут возвращать значение (называемое значением функции) в вызывающий блок. Значение функции является необязательным параметром. Функции не сохраняют информацию и не имеют назначенного блока данных;
- *блоки данных* (*Data blocks*, DB) — содержат данные пользовательской программы. При программировании блоков данных определяется форма хранения данных (номер блока, структура данных и тип используемых данных). Блоки данных используются либо в качестве глобальных блоков данных (*global data blocks*), либо в качестве экземплярных блоков данных (*instance data blocks*).

Глобальный блок данных в пользовательской программе является «свободным» блоком данных и не назначается функциональному блоку. Экземплярный блок данных назначен функциональному блоку и хранит часть локальных данных этого блока.

Количество блоков определенного типа и размер блоков зависят от типа процессора и объема его памяти.

Системные блоки, являясь компонентами операционной системы, могут содержать программы (системные функции (SFC) или системные функциональные блоки (SFB)) или данные (системные блоки данных (SDB)). Системные блоки предоставляют доступ к важным системным функциям, таким как управление внутренними таймерами процессора, коммуникационные функции.

Системные блоки можно вызывать, но нельзя изменять. Блоки не занимают места в пользовательской памяти (*user memory*), а данные этих блоков, хранящиеся в экземплярных блоках данных, используют пользовательскую память.

Системные блоки данных содержат информацию о конфигурации системы автоматизации или параметрах модулей. Система STEP 7 непосредственно генерирует эти блоки и управляет ими. Их содержимое определяется при конфигурировании станций. Как правило, блоки SDB располагаются в загрузочной памяти (*load memory*) и из пользовательской программы доступ к ним получить нельзя.

Стандартные блоки применяют в дополнение к создаваемым функциям и функциональным блокам. Они содержатся в библиотеках, входящих в состав пакета STEP 7, и, как правило, реализуют

какой-либо алгоритм, стандартно используемый в системах автоматического управления, например ПИД-регулятор.

Сигнальные модули. Основное назначение сигнальных модулей — ввод и вывод аналоговых и дискретных сигналов. В зависимости от типа и направления распространения сигнала модули содержат аналого-цифровые, цифроаналоговые, дискретно-цифровые и цифро-дискретные преобразователи. С одной стороны, преобразователи подключены к электронным цепям задней шины контролера, а с другой — выходные цепи выведены на клеммные колодки (фронтштекеры) с лицевой стороны модуля.

Для синхронизации передачи данных между процессорным и сигнальным модулями используются ячейки памяти (регистры), расположенные в самом сигнальном модуле. В этих ячейках памяти хранится текущее состояние сигналов модуля (так называемая область I/O).

Выполняя роль буфера, ячейки памяти позволяют организовать передачу данных в/из процессорного модуля без задержек, которые возникают при выполнении процедур преобразования.

Сигналу каждой цепи при конфигурировании контроллера автоматически назначается адрес. Рабочая программа, обращаясь по этим адресам, фактически производит чтение с модулей ввода и формирует сигналы на модулях вывода, т. е. организуется программная (виртуальная) связь между электрическими сигналами с датчиков к исполнительным устройствам и рабочей программой.

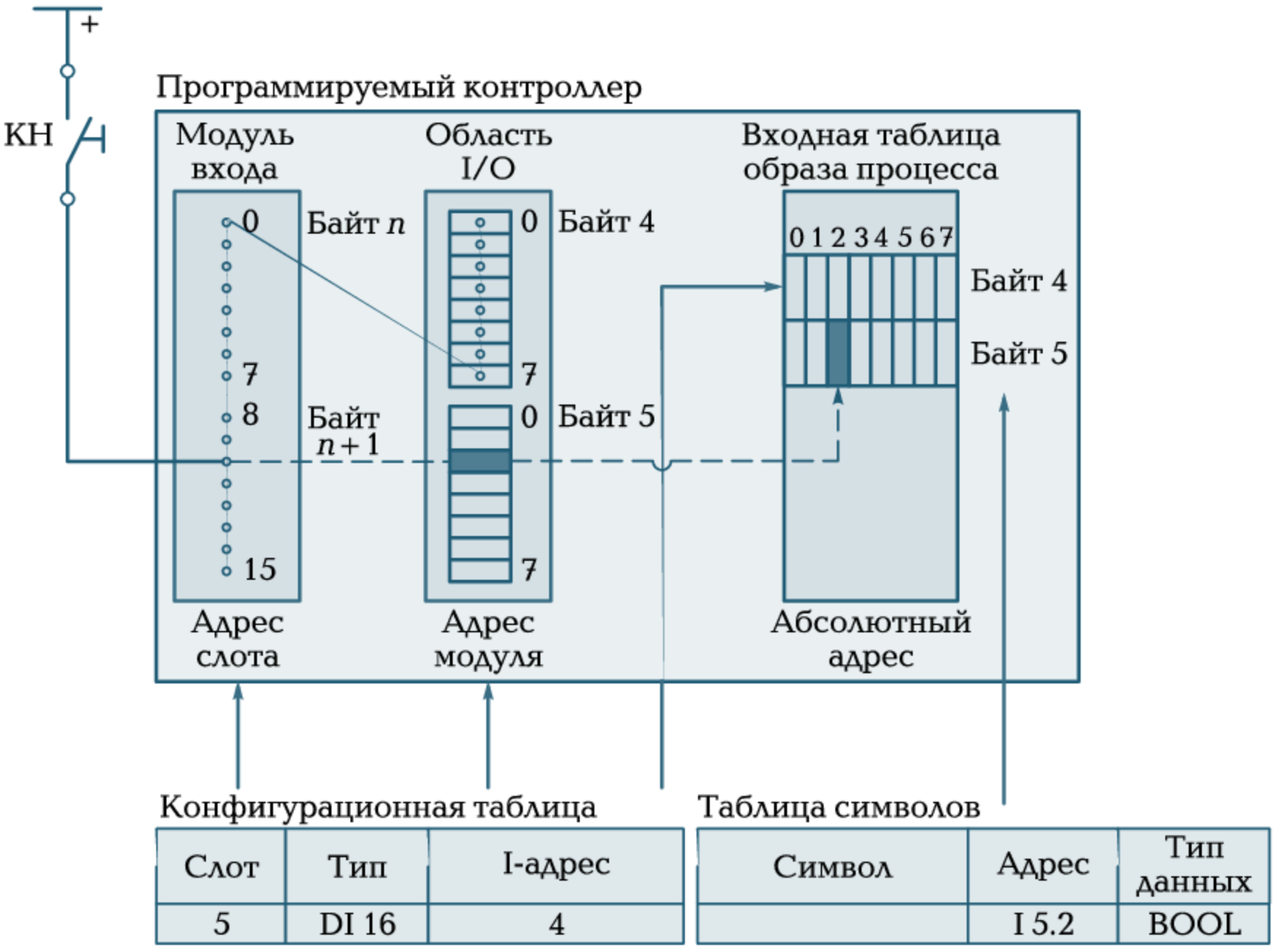
Поясним принцип адресации на примере чтения дискретного сигнала от кнопки (КН), подключенной к модулю дискретного ввода (рис. 6.22).

При конфигурировании в области I/O для ячеек памяти (регистров) сигнального модуля системой были установлены адреса — Байт 4 и Байт 5. Эти адреса являются уникальными для контроллера в целом.

В процессорном модуле в системной области отображения адресов входов отводятся два байта, имеющих такие же адреса, что и установленные для модуля ввода, и создается виртуальная связь между ячейками памяти модуля ввода и ячейками памяти области адресов входных сигналов.

При изменении состояния сигнала во входных цепях модуля изменяются значение ячеек памяти этого модуля и состояние ячеек памяти в области адресов входных сигналов.

Перенос данных из ячеек памяти модуля в область отображаемой памяти проводится в начале каждого цикла выполнения программы



Слот	Тип	I-адрес
5	DI 16	4

Символ	Адрес	Тип данных
	I 5.2	BOOL

Рис. 6.22. Принцип программной организации связи между электрическими сигналами с датчиков и рабочей управляющей программой

и называется *сканированием*. Обратный процесс переноса данных осуществляется в конце каждого цикла выполнения программы.

Например, при нажатии на кнопку КН «+» напряжения питания поступает на вход 10 модуля ввода. Этот вход имеет виртуальную связь с ячейкой памяти модуля, которая является битом 2, назначенного системой байта 5, и в этой ячейке появляется значение логической «1». Одновременно по этому же адресу значение отображается в области адресов входных сигналов.

Для того чтобы рабочая программа считала этот сигнал, достаточно обратиться по адресу I5.2, где I — обозначение области адресов входных сигналов; 5 — адрес байта; 2 — адрес бита в этой области.

Возможно и прямое обращение к ячейкам памяти модуля. Однако использование отображаемой памяти имеет следующие преимущества по сравнению с непосредственным обращением к ячейкам памяти модуля: после сканирования входов и выходов доступ к данным может осуществляться побитно (биты входов/выходов напрямую не адресуются); сканирование входа и установка выхода

происходят намного быстрее, чем доступ к модулю; не тратится время на переходное (динамическое) восстановление на шине входов/выходов и время отклика системной памяти короче, чем время отклика модуля, поэтому программа выполняется намного быстрее;

Таблица 6.2. Возможное содержание полей обозначения сигнальных модулей

Номер поля	Содержимое поля	Обозначение
1	SM 3	Модуль семейства S7-300
	SM 4	Модуль семейства S7-400
2	21	Модуль дискретного ввода
	22	Модуль дискретного вывода
	23	Модуль дискретного ввода-вывода
	31	Модуль аналогового ввода
	32	Модуль аналогового вывода
	33	Модуль аналогового ввода-вывода
3	2, 4, 8, 16, 32	Количество цепей ввода-вывода
4	DI	Дискретный ввод
	DO	Дискретный вывод
	AI	Аналоговый ввод
	AO	Аналоговый вывод
5	DC 24 V	Напряжение коммутации 24 В постоянного тока
	AC 120 V	Напряжение коммутации 120 В переменного тока
	AC 230 V	Напряжение коммутации 230 В переменного тока
	DC 0,5 A	Ток коммутации 0,5 А постоянного тока
	DC 2 A	Ток коммутации 2 А постоянного тока
	AC 2 A	Ток коммутации 2 А переменного тока
	8, 10, 13, 14, 16 bit	Разрядность АЦП и ЦАП модулей аналогового ввода и вывода

сигнальное состояние входа на протяжении всего программного цикла остается неизменным (сохраняется согласованность данных в течение программного цикла). Когда бит модуля входа меняется, изменение сигнального состояния передается на вход на старте следующего программного цикла. Для выходных модулей изменение сигнального состояния во время программного цикла не влияет на биты модуля выхода, что исключает дребезжание выходного сигнала при программных ошибках.

Требование к универсальности контроллеров S7-300/400 обеспечивается большим разнообразием типов используемых сигнальных модулей. Так как контроллер является проектно компонуемым изделием, основную часть компоновки составляет правильный выбор типов сигнальных модулей, обеспечивающих ввод-вывод всех сигналов с объекта управления вне зависимости от типа сигнала и диапазона его изменения.

Число возможных сигналов, используемых в системах управления, конечно и определено требованиями к системам управления в целом, поэтому набор типов сигнальных модулей, выпускаемых фирмой Siemens, в составе системы управления Simatic полностью перекрывает все требуемые по конфигурациям ввода-вывода.

Конструктивно сигнальные модули семейства выполняются в одинаковых корпусах стандартного типоразмера. Размер модуля семейства S7-300 (Ш×В×Г) составляет 40×125×120, а модуля семейства S7-400 — 25×290×210.

Внутренний состав сигнальных модулей, их характеристики и схемы подключения внешних цепей уникальны для каждого типа модулей.

В обозначении сигнального модуля присутствует информация о характеристиках сигнального модуля, типе и количестве сигналов, подключаемых к модулю. Эта информация выведена на лицевую панель модуля.

Возможное содержание полей, используемых при обозначении сигнального модуля, приведено в табл. 6.2.

Глава 7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

7.1. ПОНЯТИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ. КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ И ВИДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Общие сведения. В условиях интенсивного использования свободно программируемых технических средств создание достоверных математических моделей технологических процессов является одним из актуальных направлений научного и экспериментального познания для эффективного управления технологическим процессом любого промышленного производства.

Разработка и умелое использование математических моделей — главное и обязательное условие экономически целесообразных способов реализации оперативного управления производственными процессами при создании эффективных систем автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии и других отраслях промышленного производства.

Модели технологических процессов могут быть концептуальные (словесные), физические, математические (формализованные) и имитационные, позволяющие программно отражать исследуемые процессы на ПЭВМ. Многообразие видов моделей и широкая область их применения, очевидно, являются основными причинами отсутствия четкой и однозначной формулировки понятия модели.

Классификация моделей. Применительно к рассматриваемым в данном учебном пособии задачам одно из общих определений понятия модели можно дать в следующем виде.

Модель — это объективное отражение наиболее существенных показателей (параметров) технологического процесса, представляющее в удобной для пользователя форме достоверную информацию о текущих значениях выходных величин.

Математические модели технологических процессов могут быть двух видов:

- контролирующие;
- прогнозирующие.

Контролирующие модели используются для расчетов технологических параметров, которые являются определяющими, но недоступными для прямого инструментального контроля.

В основном в АСУ ТП применяют ***прогнозирующие модели*** статического и динамического типа.

Динамические модели строятся на основе физических и химических свойств данного агрегата; характеризуют ход протекания технологических процессов и изменение параметров этих процессов во времени.

По своей сути в формализованном виде динамические модели представляют собой систему дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{\partial x}{\partial \tau} = f\left(x, z, u, \tau\right),$$

где x — отдельный параметр процесса; z — возмущающее воздействие на процесс; u — управляющее воздействие; τ — текущее время.

В динамическую модель технологического процесса входят и уравнения динамических тепловых балансов, включающие компоненты прихода и расхода тепла.

Динамическая модель любого технологического процесса позволяет обеспечить более высокую по сравнению со статическими моделями точность управления. Однако статические модели наиболее доступны для формализованного представления.

Под *статическими моделями* технологического процесса понимаются такие модели, в которых используется априорная информация, известная до начала процесса.

Эти модели позволяют рассчитать значение параметров и выходных величин в конце процесса по известным входным условиям в установившемся режиме, а также управляющее воздействие для получения требуемых конечных значений параметров управляемого процесса.

Статические модели составляются, исходя из представления процесса в виде объекта с сосредоточенными параметрами, не подразделяя процесс на его отдельные зоны. Поэтому не учитывается взаимодействие отдельных зон.

Математическим аппаратом объектов с сосредоточенными параметрами, как правило, являются алгебраические выражения.

Объекты с распределенными параметрами (когда учитывается взаимодействие различных параметров) описываются дифференциальными уравнениями в частных производных.

Статические модели делятся на следующие виды:

- детерминированные (балансные), построенные на основе фундаментальных законов;
- экспериментально-статистические, основанные на экспериментальных данных и применении для вычисления определенных показателей методов математической статистики;
- эмпирические, разработанные на основе формализации и обобщении лучшего опыта работы технологов-операторов (экспертов) по управлению реальным производственным процессом;
- нейросетевые, являющиеся адаптивным выражением экспериментально-статистических моделей;
- синтезируемые на принципе нечеткой логики, составляющие адаптивное выражение эмпирических моделей.

В основе ***детерминированных моделей***, как уже отмечалось, лежат фундаментальные физические законы (например, закон сохранения энергии, закон сохранения количества вещества и др.).

Поэтому эти модели можно представить в виде совокупности балансных уравнений, которые определяют переход определенных компонент из одного состояния в другое.

Для большинства технологических процессов в промышленности, которые сопровождаются выделением и поглощением тепла, детерминированные модели строятся на основе уравнений материальных и тепловых балансов.

По сути дела, речь идет о составлении уравнения вида

$$\sum_{i=1}^{h_1} G_i C_i = \sum_{j=1}^{h_2} G_j C_j,$$

где G_i и C_i — масса и концентрация i-го компонента в исходном продукте; G_j и C_j — масса и концентрация i-го компонента в конечном продукте.

Установлено, что при составлении балансных уравнений число неизвестных факторов, как правило, больше числа известных, поэтому в детерминированных моделях вводятся дополнительные уравнения, которые построены на эмпирических зависимостях или законах термодинамики для условия равновесия систем.

Достоинством детерминированных моделей является их универсальность — они позволяют определить ход однотипных процессов в среднем, недостатком — неспособность точно отразить специфические условия каждого отдельного процесса.

Как было отмечено ранее, при составлении детерминированной модели, как правило, количество получаемых уравнений оказывается меньше, чем требуется для получения адекватных математических моделей. Кроме того, детерминированные модели не отражают индивидуальные условия каждого технологического процесса.

Для того чтобы определить индивидуальные свойства управляемых процессов, используются ***экспериментально-статистические модели***. В этих моделях исследуемый реальный технологический процесс представляется как объект с неполным знанием механизма явлений, происходящих в этом объекте, т. е. как «черный ящик».

Технологический процесс можно характеризовать следующими переменными:

- $X_1, X_2, ..., X_n$ — входные контролируемые управляемые факторы (параметры);
- $Y_1, Y_2, ..., Y_n$ — выходные контролируемые показатели эффективности технологического процесса;
- $Z_1, Z_2, ..., Z_n$ — случайные переменные (помехи), неконтролируемые и неуправляемые.

Любой технологический процесс подвержен воздействию многих случайных факторов, влияние которых на процесс не может быть точно определено из-за отсутствия необходимой информации. Поэтому для анализа воздействия этих случайных факторов на исследуемый процесс используются методы математической статистики, которые позволяют создать статистическую модель исследуемого процесса.

Как правило, экспериментально-статистическая модель представляет собой одно- или многофакторные линейные (где каждый фактор в первой степени) или нелинейные (где каждый фактор минимум во второй степени) регрессионные уравнения.

Регрессионное уравнение определяет статистическую вероятностную связь между выходным параметром процесса и учитываемыми факторами.

Коэффициенты таких уравнений рассчитываются методами математической статистики по экспериментальным данным, которые получаются путем фиксирования текущих значений входных и выходных параметров.

В результате получается уравнение, которое называют теоретической линией регрессии, определяющее статистическую (вероятностную) связь между входными и выходными параметрами.

Существует два вида регрессионных зависимостей — функциональная, когда каждому значению аргумента соответствует единственное значение функции $y = f(x)$, и статистическая, или вероят-

ностная, когда одному значению аргумента соответствует в общем случае целый ряд распределения значений функции $\overline{y} = f(x_i)$. Первый и второй виды функциональной зависимости выходного управляемого технологического параметра от входного управляющего воздействия характерны как для расчетных способов синтезирования моделей, так и при использовании экспериментальных данных, полученных непосредственно с реального технологического агрегата в процессе его функционирования.

Для построения экспериментально-статистической модели по опытным данным наиболее широкое распространение получил *метод наименьших квадратов*.

Суть этого метода заключается в следующем: необходимо найти такую функцию $\overline{y} = f(x_i)$, которая наиболее точно отражала бы состояние системы (приближение к каждой экспериментальной точке). Это условие можно записать формулой (2.2), где y_i — текущее значение выходного параметра; $\overline{y}(x_i)$ — расчетное значение выходного параметра.

Метод наименьших квадратов для получения регрессионного уравнения не является единственным.

Кроме него существуют *интерполяционные преобразования Лагранжа и интерполяционные полиномы Чебышева*, но метод наименьших квадратов наиболее технологически понятен и физически более объясним.

Примером экспериментально-статистической модели может служить статическая характеристика управляемого процесса, для построения которой используются экспериментальные данные, полученные с реального объекта (см. подразд. 2.4).

Появление ПЭВМ позволило реализовать такие схемы постановки эксперимента и способы обработки полученных в ходе эксперимента результатов, которые значительно увеличили эффективность экспериментально-статистического метода построения математической модели производственного процесса.

Экспериментальные данные, необходимые для построения математической модели технологического процесса, могут быть получены двумя способами:

- в результате пассивного наблюдения за исследуемым процессом;
- за счет постановки и реализации активного, заранее спланированного эксперимента.

В первом случае экспериментальные данные получают путем наблюдения и регистрации в определенные моменты времени теку-

щих значений входных и выходных переменных технологического процесса (хронометраж процесса).

Но даже при таком пассивном наблюдении (пассивном эксперименте) требуется составить определенный план сбора исходных данных, обосновать выбор наиболее значимых факторов и определить с учетом инерционности интервал времени съема информационных сигналов для каждого фактора.

Достоинством пассивного метода является отсутствие любого вмешательства в технологический процесс, что упрощает процедуру сбора экспериментальных данных и практически исключает создание аварийных или сложных ситуаций на технологическом агрегате в производственных условиях.

Однако такой способ сбора экспериментальных данных обладает целым рядом серьезных недостатков, наличие которых обусловлено использованием универсального инженерного метода наименьших квадратов при определении уравнения зависимости выходного параметра от входных величин, основными, нередко трудновыполнимыми, требованиями которых являются следующие:

- входные контролируемые параметры процесса X_1, X_2, ..., X_n (теоретически неслучайные) необходимо измерять с точностью, значительно превышающей точность измерения выходной контролируемой величины Y_i;
- входные параметры X_1, X_2, ..., X_n не должны быть статистически связаны (коррелированы) между собой. Это условие сложно соблюдать в реальных производственных условиях;
- выходной контролируемый параметр Y_i должен быть случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения;
- рассеяние (дисперсия) выходного контролируемого параметра Y_i не должно зависеть от абсолютной величины этого параметра (условие равноточности опытов).

Несоблюдение отмеченных требований нередко приводит к значительным ошибкам.

При использовании пассивного эксперимента необходимо учитывать следующие особенности реального процесса.

Некоторые факторы исследуемого процесса при постановке пассивного эксперимента изменяются незначительно, так как экспериментально было определено в какой-то мере их оптимальное значение.

Тогда при оценке значимости коэффициентов уравнения регрессии этот оптимально выбранный фактор, существенно влияющий на процесс, окажется незначимым.

Многих указанных недостатков можно избежать, если специальным образом спланировать эксперимент для сбора экспериментальных данных, т. е. активно вмешаться в технологический процесс, и менять каждый фактор отдельно на определенных уровнях по определенному плану. При этом реализацию составленного плана необходимо осуществлять случайным образом.

Такой метод сбора экспериментальных данных называют *активным полнофакторным экспериментом* (ПФЭ).

Если варьирование фактора осуществляется на двух уровнях — минимальном и максимальном по отношению к среднему значению, то этот ПФЭ называют экспериментом типа 2^n, где n — число варьируемых факторов.

Достоинством данного метода является автоматическое соблюдение правила воспроизводимости результата, независимость факторов друг от друга и равноточность; недостатком — трудность реализации в производственных условиях.

Различают два вида активного эксперимента:

- однофакторный;
- многофакторный.

При *однофакторном эксперименте* производят поочередное варьирование одной переменной, оставляя остальные на постоянных уровнях (текущих значениях). По сути дела это метод Гаусса — Зейделя, который требует проведения большого числа опытов (экспериментов), количество которых не регламентировано.

Значительно эффективнее *многофакторный* (активный факторный) *эксперимент*. В этом случае в каждом эксперименте осуществляется варьирование всех входных факторов (переменных) по определенному рандомизированному плану. Это позволяет значительно сократить и регламентировать количество экспериментов.

На основе описания локального участка поверхности отклика $Y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$ в этом случае можно целенаправленно выбрать направление «крутого восхождения». В результате выполнения нескольких таких этапов восхождения можно достичь окрестности экстремума при решении оптимизационных задач с минимальными затратами времени и средств.

Достоинством экспериментально-статистической модели является точное отражение индивидуальных характеристик процесса, так как она составляется по экспериментальным данным, недостаток заключается в отсутствие универсальности, т. е. они пригодны только для рассматриваемого процесса. Кроме того, статистические модели ограничены в диапазоне. Они обладают свойством интерполяции

и лишены свойства экстраполяции, т. е. их нельзя применять для участков, по которым нет экспериментальных данных.

Эмпирические модели. Каждому типу рассмотренных ранее моделей свойственны свои недостатки: детерминированные балансовые модели очень громоздкие, требуют знания основных законов и обычно реализуются с использованием некоторых допущений и эмпирических зависимостей; статистические модели лишены универсальности и пригодны только для определенного объекта, только в определенном интервале изменения фактора, и требуют периодического уточнения в процессе использования агрегата.

Эмпирический метод создания математической модели является синтезом двух рассмотренных ранее методов.

Принцип составления модели при этом методе основан на формализации действий лучших технологов-операторов (экспертов) по управлению данным технологическим процессом. Технолог в течение определенного, достаточно продолжительного этапа работы по управлению реальным процессом, и в результате общения с мастером вырабатывает свой алгоритм коррекции управляющих воздействий, которые приводят к решению поставленной задачи.

Этот алгоритм по каждому управляющему воздействию сводится к определению результирующей поправки:

$$\Delta q = a_1(x_1(\tau - 1) - x_1(\tau)) + a_2(x_2(\tau - 1) - x_2(\tau)) + ...,$$

где $x_i(\tau - 1)$ и $x_i(\tau)$ — управляющие воздействия в предшествующий и текущий моменты времени.

Таким образом, суть эмпирических моделей заключается в формировании по каждому параметру корректирующих поправок для управления n-м процессом по результату, полученному при управлении $(n - 1)$-м процессом (метод проб и ошибок).

По внешнему виду эмпирические модели не отличаются от статистических, и при формализации опыта эксперта используются упрощенные балансовые уравнения для определения корректирующих поправок, формируемых по результату предыдущего управления.

Вся модель в результате этого представляет собой сумму элементарных поправок воздействия каждого исследуемого фактора на общую оценку.

В последнее время в связи с интенсивным ростом вычислительных способностей микропроцессорных регулирующих контроллеров (МРК) появились реальные возможности создания ***нейросетевых моделей*** АСУ ТП, использующих принципы мыслительного процесса человека.

Синтезируемые искусственные нейронные сети (ИНС) при создании моделей по сути являются разновидностью адаптивных экспериментально-статистических эмпирических моделей технологических процессов. В ИНС на основе формализации мыслительного процесса принятия решения используются нейросетевые алгоритмы для решения поставленных технических и экономических задач.

Не секрет, что любой квалифицированный технолог-оператор за продолжительный срок производственной деятельности по управлению конкретным технологическим процессом вырабатывает субъективный алгоритм эффективного управления процессом. Очевидно, что эмпирический метод принятия эффективных решений на основе проб и анализа полученных результатов и ошибок требует совершенствования.

Эта задача эффективно решается с использованием ИНС в направлении увеличения быстродействия и повышения точности.

В общем случае ИНС — это система, приближенно моделирующая работу человеческого мозга, и практически реализуется в виде компьютерной рабочей программы, которая сходна с мыслительным процессом в двух аспектах:

- знание приобретается ИНС в процессе обучения на основе анализа экспериментальных данных и сведений из реальных условий;
- для обучения сети нейронов, образующих ИНС, используется корректировка межнейронных связей, называемых синаптическими весами.

Суть корректировки синаптических весов заключается в логическом усилении воздействий на нейроны в направлении приближения к правильному решению (текущему значению технологического параметра) и подавлении воздействий, способствующих увеличению ошибки приближения выходного генерируемого ИНС результата по отношению к текущему экспериментальному значению, полученному с реального объекта.

В связи с развитием свободно программируемых технических средств управления широкое распространение получают системы, ***математические модели которых основаны на принципах теории нечетких множеств и нечетких логических выводов***.

Принцип нечеткой логики был создан для того, чтобы позволить управляющим программам эффективно функционировать в диапазоне различных степеней истины.

Вместо двоичных систем, способных логически отображать только истинные и ложные события, были введены степени истины, которые действуют в диапазоне от 0,00 до 1,00 включительно.

Нечеткие модели управления оказываются особенно полезными, когда технологические автоматизируемые процессы являются слишком сложными для анализа с использованием общепринятых количественных методов, или когда доступные источники информации интерпретируются атрибутивно, качественно или неопределенно.

Принцип нечеткой логики, на котором основано нечеткое управление технологическим процессом, по сути приближается к логике человеческого процесса мышления и лингвистическому (словесному) представлению принципа автоматизированного управления.

Наличие математического (формализованного) определения и средств отражения нечеткой исходной информации позволяет создавать математические модели управления, адекватные реальным процессам.

Системы управления, основанные на принципе нечеткой логики, обладают неоспоримыми преимуществами перед традиционными способами автоматизированного управления за счет замены, как правило, упрощенной количественной модели управляемого технологического процесса многосторонней качественной лингвистической (выраженной в понятной технологическому персоналу словесной форме) логической моделью, составленной из набора логических правил управления, задаваемых в форме: если «событие», то «вид управления».

7.2. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЗВЕНЬЕВ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ VISSIM

Назначение программы VisSim. Программа VisSim (от англ. *Visual Simulator* — визуальная, воспринимаемая зрением, среда и средство моделирования), разработанная компанией Visual Solutions (США), предназначена для построения, исследования и оптимизации виртуальных моделей физических и технических объектов, в том числе и систем управления. Эта программа — мощное, удобное в использовании, компактное и эффективное средство моделирования физических и технических объектов, систем и их элементов.

Программа предоставляет человеку развитой графический интерфейс, с помощью которого исследователь создает модель из

виртуальных элементов с некоторой степенью условности так, как если бы он строил реальную систему из настоящих элементов. Это позволяет создавать, а затем исследовать и оптимизировать модели систем широкого диапазона сложности.

При описании и последующем построении модели в среде VisSim нет необходимости записывать и решать дифференциальные уравнения, программа это сделает сама по предложенной ей исследователем структуре системы и параметрам ее элементов. Результаты решения выводятся в графической форме. Поэтому программой могут пользоваться и те, кто не имеет глубоких познаний в математике и программировании на языках высокого уровня или ассемблере. В то же время специалисты, владеющие программированием, могут создавать собственные блоки, дополняя ими богатую библиотеку стандартных блоков программы VisSim.

В программе VisSim можно решать дифференциальные уравнения и значительно эффективнее и быстрее, чем при использовании известной математической программы MathCAD. При соизмеримой и более высокой производительности, чем у программы Simulink, входящей в программный пакет MathLab, VisSim занимает в сотни раз меньше места на жестком диске и в оперативной памяти, и помимо задач по математике позволяет решать задачи по физике, начиная с уровня школьных и заканчивая серьезными физическими экспериментами на виртуальных лабораторных стендах.

Графический интерфейс VisSim. Интерфейс программы — это совокупность средств, позволяющих человеку общаться с ней:

- вводить и получать данные;
- контролировать ход выполнения компьютером программы;
- подавать управляющие воздействия и наблюдать реакцию на них программы и т. п.

Программа VisSim предоставляет исследователю графический интерфейс, позволяющий основную часть работы по созданию модели выполнять с помощью мыши, а параметры элементов вводить с клавиатуры. Интерфейс VisSim состоит из главного окна, имеющего меню и ряд кнопок управления, воспринимающих щелчки кнопок мыши, и рабочего пространства, в котором строится и корректируется модель, наблюдаются результаты ее работы (рис. 7.1).

С точки зрения исследователя интерфейс программы VisSim представляет собой интерактивный виртуальный лабораторный стенд, обеспечивающий построение моделей из отдельных блоков, запуск процесса моделирования, управление им и контроль результатов.



Рис. 7.1. Главное окно программы VisSim и ее рабочее пространство с примером простой VisSim-диаграммы (модели)

На рабочее пространство вынесены виртуальные блоки: генератор и осциллограф, а также надписи. При запуске процесса моделирования (щелчком по кнопке с зеленым треугольником Пуск — Go) на осциллографе изображается сигнал, вырабатываемый генератором, в данном случае — синусоида. Амплитуду, частоту и начальную фазу сигнала генератора исследователь может менять, и при новом запуске моделирования эти изменения будут приводить к соответствующему изменению графика на экране осциллографа. В верхней части окна отображается название диаграммы.

Диаграммой в программе VisSim называется совокупность связанных, а также автономных блоков и надписей, помещенных на рабочее пространство и способных функционировать при запуске процесса моделирования. Диаграмма может быть сохранена в виде отдельного файла и, при необходимости, открыта вновь.

Модель программы VisSim это часть диаграммы, содержащая виртуальный аналог реальной или проектируемой системы. Диаграмма может состоять из нескольких моделей.

К модели программы VisSim могут быть подключены с помощью дополнительных компьютерных плат и внешние физические устройства, которыми модель системы, построенная в программе VisSim, сможет управлять. Таким образом, ОУ модели системы автоматического управления, построенной в программе VisSim, могут быть не только виртуальные, но и реальные устройства.

Принципы построения моделей в среде VisSim. Исходными данными для построения модели в среде VisSim являются структурно-функциональная схема моделируемой системы (процесса, объекта) и описывающие их дифференциально-алгебраические уравнения. Вместо уравнений могут быть заданы операторы или функции, характеризующие отдельные элементы моделируемой системы, например, передаточные функции — для линейных элементов и статические характеристики — для нелинейных.

Реальные системы и объекты состоят из отдельных, связанных и взаимодействующих друг с другом элементов. Как для системы в целом, так и отдельных ее элементов, можно указать место приложения воздействия — вход и место их реакции (отклика) на входное воздействие — выход.

Модели систем и объектов в программе VisSim строятся из отдельных элементов — так называемых блоков. Блок это виртуальный аналог физического элемента реальной системы. «Виртуальный» в данном контексте значит «воображаемый», физически не существующий, реализуемый программно, но с точки зрения человека, работающего с моделирующей программой, блок воспринимается органами зрения — он видим на рабочем пространстве VisSim. Термин «аналог» предполагает, что блок функционирует, т. е. подчиняется тем же уравнениям, что и реальный, моделируемый, элемент системы.

Виртуальные блоки VisSim могут иметь только вход, на который может быть подан выходной сигнал другого блока, только выход, виртуальный сигнал с которого может быть подан на вход другого блока, или вход и выход одновременно. Взаимодействие между блоками отображается линиями связи, указывающими направление передачи воздействий (сигналов) от одного блока к другому.

Взаимодействие между блоками моделируется сигналами — функциями времени, передаваемыми между блоками по линиям связи. Сигналы в модели измеряют с помощью виртуальных измерительных устройств виртуального осциллографа.

Внешне виртуальные блоки VisSim с некоторой степенью условности воспринимаются исследователем так же, как реальные устройства (например, генераторы вырабатывают сигналы, блоки-преобразователи реагируют на входные сигналы в определенном смысле точно так же, как реальные устройства на реальные воздействия, индикаторы показывают величины сигналов).

Таким образом принцип построения модели в среде VisSim состоит в вынесении на рабочее пространство моделей реальных элементов (блоков) и соединении их в соответствии с заранее

составленной структурно-алгоритмической схемой моделируемой системы. Такое построение модели из виртуальных блоков очень похоже, с известной степенью условности, на построение реальной системы из настоящих блоков (генераторов, осциллографов и других устройств) в производственных условиях или на лабораторном стенде.

Основные блоки VisSim. Блоки VisSim можно условно разделить на три основные и одну дополнительную категории:

- *генераторы* — блоки, имеющие только выход;
- *преобразователи* — блоки, имеющие вход и выход;
- *индикаторы* — блоки, имеющие только вход (осциллограф, цифровой индикатор);
- блоки без входов и выходов: надписи, комментарии и др.

Важным компонентом модели является *соединительная линия* — виртуальный аналог физического соединения элементов, передающего воздействия от одного элемента к другому. Соединительные линии в среде VisSim однонаправленные; они передают сигналы с выхода одного блока к входу другого. Поэтому при построении модели следует так разделять реальную систему на функциональные блоки, чтобы последующий блок практически не влиял на функционирование предыдущего. На рис. 7.2 в качестве примера реализации в VisSim приведена структурная схема САР частоты вращения вала двигателя постоянного тока.

Необходимо отметить, что входные и выходные сигналы могут быть как одиночными функциями времени, так и набором таких функций. В последнем случае сигнал называют *векторным*, как и соответствующий вход или выход блока.

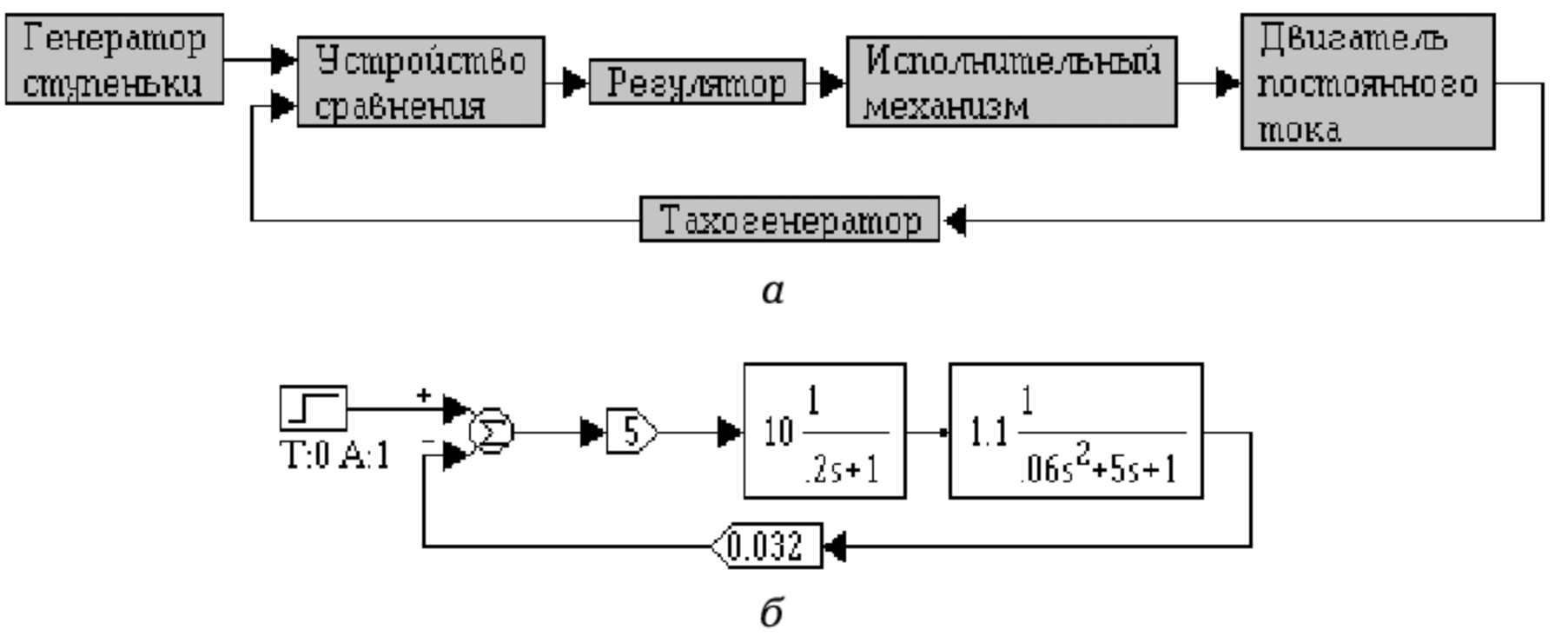


Рис. 7.2. Исходная функциональная схема САР частоты вращения вала двигателя постоянного тока (*а*) и ее структурно-алгоритмическая модель (*б*)

Генераторы вырабатывают изменяющиеся во времени или постоянные сигналы.

Примерами таких блоков в VisSim являются блоки:

- **step** (ступенька) — генератор ступенчатой единичной функции $1_0(t)$;
- **ramp** (спуск, подъем) — генератор линейно растущего сигнала $t \cdot 1_0(t)$;
- **sinusoid** — генератор синусоидального сигнала $X_m \sin(\omega t + \varphi)$;
- **const** — генератор постоянного сигнала, величина которого не меняется в процессе работы модели;
- **slider** (скользящий контакт, ползунок) — генератор постоянного сигнала, величину которого можно менять в процессе работы модели, ухватившись левой кнопкой мыши за курсор.

Для помещения блока на рабочее пространство следует щелкнуть по пункту меню **Blocks**, перейти к пункту **Signal Producer**, затем щелкнуть по названию требуемого генератора, перевести курсор в нужное место рабочего пространства и щелкнуть левой кнопкой мыши.

Преобразователи способны воспринимать воздействия от других блоков, преобразовывать их в соответствии с определенными уравнениями или правилами и выдавать преобразованный сигнал (отклик, реакцию блока) на выход.

Важнейшие блоки для моделирования линейных систем:

- **transferFunction** — передаточная функция (блок позволяет создавать модели как простых, так и очень сложных инерционных элементов линейных систем и систем в целом);
- **integrator** — блок интегратора, осуществляющий интегрирование входного сигнала по времени и являющийся фундаментальным кирпичиком любой модели линейной системы;
- **summingJunction** — сумматор двух и более сигналов, его выходной сигнал равен сумме входных;
- **gain —** усилитель.

Сумматор и усилитель вызываются путем выбора пунктов меню: **Blocks** → **Arithmetic** → **summingJunction** или **gain** (усилитель).

Индикаторы — это блоки, имеющие только вход. Индикаторы программы VisSim предназначены для отображения сигналов в форме, удобной и привычной для исследователя.

Важнейшими индикаторами являются блоки:

- **plot** — осциллограф;
- **display** — цифровой индикатор.

Осциллограф предназначен для графического представления в течение некоторого временно́го интервала зависимости мгновенной величины исследуемого сигнала от времени.

Виртуальный осциллограф программы VisSim представляет собой окно, похожее на экран осциллографа, в котором изображается зависимость наблюдаемых сигналов от времени. На боковой стороне осциллографа помещены условные изображения входов, к которым могут быть подключены выходы других блоков диаграммы для наблюдения поведения их сигналов в зависимости от времени.

Цифровой индикатор **display** программы VisSim выводит и показывает в цифровом виде значение сигнала на выходе того блока, к которому он подключен. Этот прибор используется для измерения постоянных величин.

Надписи и комментарии. Надписи позволяют создавать на рабочем пространстве диаграммы VisSim текстовые области, которые помогают понять смысл диаграммы и содержат сведения об исполнителе и времени создания диаграммы. Основной блок: **label** — надпись (**Blocks → Annotation → label**).

Принципы управления моделью и получения результатов моделирования. Построенную модель запускают в работу, щелкнув по кнопке с зеленым треугольником **Пуск**.

В результате работы модели выходные сигналы блоков начнут изменяться, их значения просматривают на виртуальном осциллографе и других индикаторах. Параметры некоторых сигналов и блоков исследователь может изменять в процессе работы модели, другие параметры можно изменить, остановив процесс работы модели. Продолжительность работы модели можно задавать до ее запуска, но имеется возможность и прервать работу модели по желанию исследователя.

В программе VisSim линейные апериодическое, колебательное и более сложные *типовые звенья* САР выносятся на рабочее пространство с помощью блока **transferFunction — передаточная функция** (**Blocks — Linear System — transferFunction**) с последующим заданием параметров звена в окне диалога, вызываемого двойным щелчком (или однократным правой кнопкой мыши) по блоку. Вид блока до и после задания параметров приведен на рис. 7.3, *а*, *б*.

Блок **transferFunction** на рабочем пространстве программы VisSim формально задается (обозначается) передаточной функцией, однако работает он не в соответствии с формулой, определяющей с помощью передаточной функции изображение выходного сигнала по изображению входного, а непосредственно решая соответствующее дифференциальное уравнение, имеющее те же параметры, что и передаточная функция. Формула передаточной функции в блоке на рабочем пространстве отображается вместо

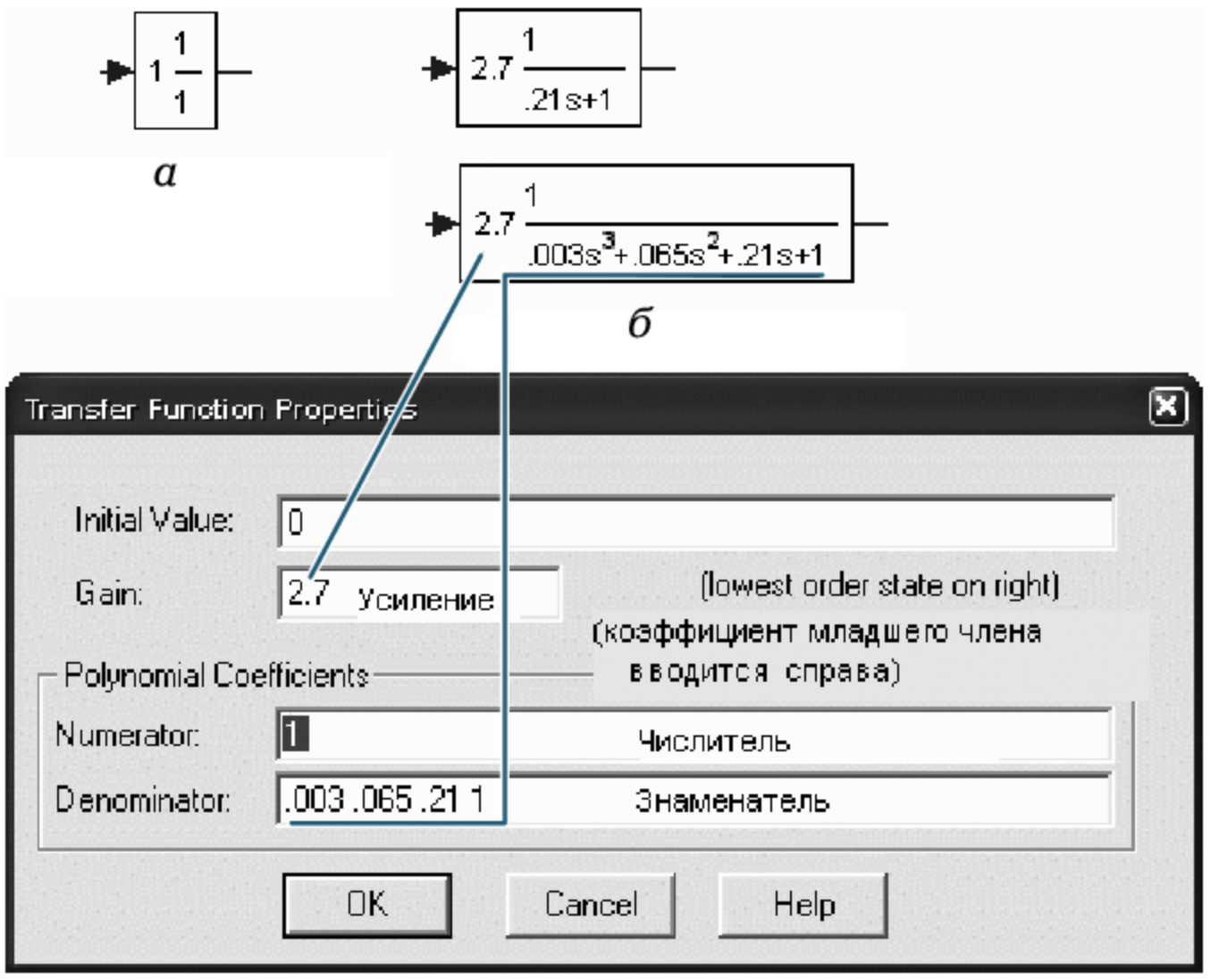


Рис. 7.3. Вид блоков **transferFunction** на рабочем пространстве программы VisSim (*а* — до задания параметров; *б* — после задания параметров). Внизу показана часть окна диалога для задания параметров линейного звена в блоке **transferFunction**

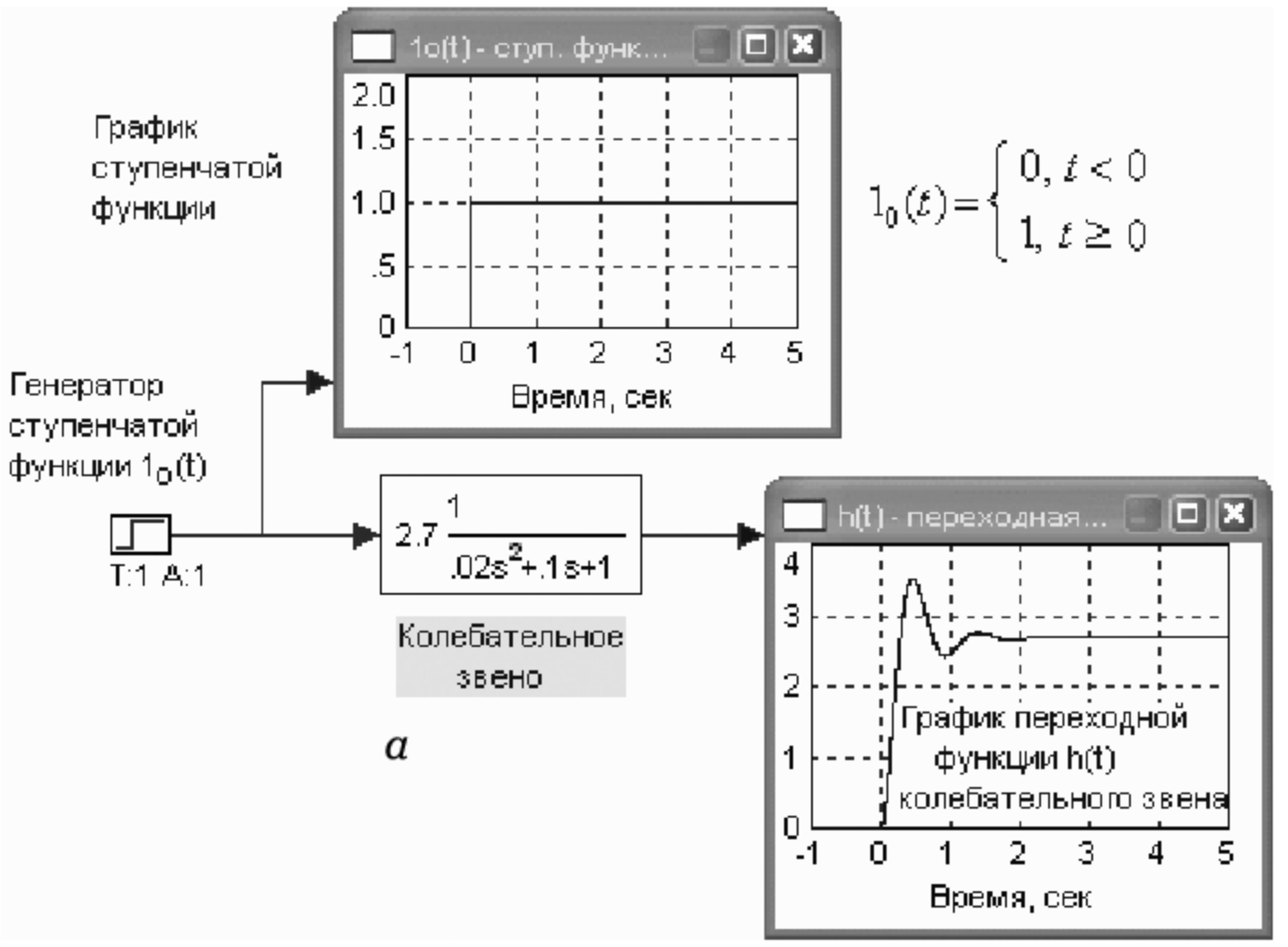


Рис. 7.4. Пример виртуального лабораторного стенда, построенного в программе VisSim, для определения переходных характеристик звеньев (*а*), и осциллограмма переходной функции колебательного звена (*б*)

дифференциального уравнения просто из соображений экономии места на рабочем поле.

Пропорциональное звено выносится на рабочее пространство из пункта меню (**Blocks — Arithmetic — gain**), интегратор — из пункта меню (**Blocks — Integration — Integrator**), звено запаздывания — из пункта меню (**Blocks — Time Delay — timeDelay**).

Переходная характеристика САР позволяет характеризовать ее качество (быстродействие и точность) в переходном режиме работы. Кроме того, зная переходную функцию линейной системы, можно определить реакцию системы на произвольное воздействие.

Важное для практики приложение переходной функции — идентификация объектов и систем, которая заключается в определении по экспериментально снятой переходной функции вида типового звена. С помощью типового звена можно промоделировать отдельные элементы и системы в целом, а также определить параметры моделирующих звеньев.

Для получения переходной характеристики используется блок генератора ступенчатой функции (рис. 7.4).

Перечень сокращений

АЛУ — арифметико-логическое устройство
АРМ — автоматизированное рабочее место
АСУ ТП — автоматизированные системы управления технологическими процессами
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
ВАХ — вольт-амперная характеристика
ВВ(I/O) — ввод/вывод (in/out) информации
ВЗУ — внешнее запоминающее устройство
ВУ — внешние устройства; выходные устройства
ВФС — вторичный самопишущий прибор с ферродинамическим компенсатором
ГСП — Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации
Д — датчик
ДВ — двигатель
ДМ — демодулятор
ЖКИ — жидкокристаллический индикатор
ЗУ — задающее устройство
ЗУПВ — запоминающее устройство с произвольной выборкой
ЗЭ — запоминающий элемент
ИМ — исполнительный механизм
ИМС — интегральные микросхемы
ИНС — искусственные нейронные сети
ИП — источник питания
ИСПУ — интегрированная система проектирования и управления
ИТ — источник тока
И-регулятор — интегральный регулятор
ИУ — исполнительное устройство
КИП — контрольно-измерительные приборы
КНК — кремний-на-кремний
КПД — коэффициент полезного действия

КТС — комплект технических средств
М — модулятор
МДП — металл-диэлектрик-полупроводник
МНК — метод наименьших квадратов
МОП — металл-оксид-полупроводник
МРК — микропроцессорные регулирующие контроллеры
МЭО — механизм электрический однооборотный
НП — нуль-прибор
НСХ — номинальная статическая характеристика
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство
ООС — отрицательная обратная связь
ОП — оптоэлектронный преобразователь
ОС — обратная связь
ОУ — объект управления
П-регулятор — пропорциональный регулятор
ПД-регулятор — пропорционально-дифференциальный регулятор
ПДП(DMA) — прямой доступ к памяти
ПЗУ — постоянное запоминающее устройство
ПИ-регулятор — пропорционально-интегральный регулятор
ПИД-регулятор — пропорционально-дифференциально-интегральный регулятор
ПЛК(PLC) — программируемые логические контролеры
ПНН — преобразователь напряжения в напряжение
ПНТ — преобразователь напряжения в ток
ПО — программное обеспечение
ПОС — положительная обратная связь
ПФЭ — полнофакторный эксперимент
РД — реверсивный двигатель
РО — регулирующий орган
САР — система автоматического регулирования
САУ — система автоматического управления
СУБД — система управления базами данных
ТВР — термопреобразователь вольфрамрений-вольфрамрениевый
ТЖКн — термопреобразователь железо-константановый
ТМКн — термопреобразователь медь-константановый
ТНН — термопреобразователь нихросил-нисиловый
ТП — термопара
ТПП — термопреобразователь платинородий-платиновый

ТПР — термопреобразователь платино-родиевый
ТСМ — термометры сопротивления медные
ТСП — термометры сопротивления платиновые
ТХА — термопреобразователь хромель-алюмелевый
ТХК — термопреобразователь хромель-копелевый
ТХКн — термопреобразователь хромель-константановый
УВМ — управляющие вычислительные машины
УВС — усилитель входного сигнала
УК — узел компенсации
УН — усилитель небаланса
УР — усилитель реохорда
УРС — Универсальная международная система автоматического контроля, регулирования и управления
УУ — управляющее устройство
Ф — фильтр
ФГУ — функционально-групповое управление
ФД — фотоэлектрические датчики
ЦАП — цифроаналоговый преобразователь
ША — шина адреса
ШД — шина данных
ШИМ — широтно-импульсный модулятор
ШУ — шина управления
ЭДС — электродвижущая сила
ЭС — элемент сравнения
ЭЭПЗУ — электрически программируемые постоянные запоминающие устройства
CP — Communications Processors (коммуникационные процессоры)
DB — Data Blocks (блоки данных)
IM — Interface Modules (интерфейсные модули)
FB — Functional Blocks (функциональные блоки)
FM — Functional Modules (функциональные модули)
HMI — Human-machine interface (человеко-машинный интерфейс)
PS — Power Supply (источник питания)
SM — Signal Modules (сигнальные модули)

Список литературы

1. *Андреев С. М.* Принципы построения и организации комплексов технических средств в системах автоматического управления. Курс лекций / С. М. Андреев. — Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г. И. Носова, 2008. — 132 с.

2. Аппаратные средства и программное обеспечение контроллеров SIMATIC S7-300/400 / [С. М. Андреев, М. Ю. Рябчиков, Е. С. Рябчикова и др.]. — Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2011. — 197 с.

3. *Восконьянц А. А.* Автоматизированное управление процессами прокатки / А. А. Восконьянц. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 85 с.

4. *Кулаков Г. Т.* Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: Справочное пособие / Г. Т. Кулаков. — Минск : Высш. шк., 1994. — 192 с.

5. *Левшина Е. С.* Электрические измерения физических величин (измерительные преобразователи) / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. — Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. — 320 с.

6. Локальные стабилизирующие контуры автоматического управления в АСУ ТП промышленного производства / [Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, О. С. Логунова и др.]. — Магнитогорск : Полиграфия, 2012. — 406 с.

7. *Парсункин Б. Н.* Идентификация элементов систем автоматизации и оптимизация контуров управления технологическими процессами / Б. Н. Парсункин. — Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 1997. — 134 с.

8. *Раннев Г. Г.* Методы и средства измерений / Г. Г. Раннев. — М. : Изд. центр «Академия», 2003. — 336 с.

9. *Фрайден Дж.* Современные датчики : Справочник / Дж. Фрайден. — М. : Техносфера, 2005. — 592 с.

10. *Фрер Ф.* Введение в электронную технику регулирования / Ф. Фрер, Ф. Орттенбургер. — М. : Энергия, 1973. — 192 с.

Оглавление

Введение 4

ЧАСТЬ I. **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСЛОЖНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ** 7

Глава 1. Методы и функции управления технологическими процессами 8

1.1. Назначение, цели и функции систем автоматизации 8
1.2. Структура и функции современных автоматизированных систем управления технологическими процессами 10

Глава 2. Системы автоматизации технологических процессов 20

2.1. Значимость процессов автоматического управления 20
2.2. Основные элементы систем автоматического регулирования 22
2.3. Классификация систем автоматического регулирования 24
2.4. Основные положения теории управления 29
2.5. Классификация объектов и определение параметров объекта по кривой разгона 48
2.6. Динамические характеристики и параметры типовых звеньев, составляющих контур регулирования 53
2.7. Типовые законы регулирования 64
2.8. Оптимизация параметров динамической настройки локального контура управления технологическим процессом 71
2.9. Оптимизация параметров динамической настройки контуров управления объектом без самовыравнивания 80

Глава 3. Конструкция и принципы работы типовых элементов систем автоматизации 85

3.1. Понятие о комплексах технических средств. Государственная система приборов 85

3.2. Назначение, конструкция и принцип действия датчиков технологических параметров ... 93
3.3. Параметрические преобразователи ... 99
3.4. Генераторные преобразователи ... 114
3.5. Принципы передачи данных в системах автоматического управления ... 125

Глава 4. Интегрированные системы проектирования и управления ... 145
4.1. Структура интегрированной системы управления ... 145
4.2. Средства разработки и отладки программного обеспечения интегрированных систем управления ... 149
4.3. Структура и состав SCADA-систем. Применение в промышленном производстве ... 155

ЧАСТЬ II. **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ НЕСЛОЖНЫХ МОДУЛЕЙ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ** ... 159

Глава 5. Принципы построения и аппаратное обеспечение микропроцессорных управляющих систем ... 160
5.1. Структура типичной микропроцессорной системы управления ... 160
5.2. Способы обмена информацией в микропроцессорной системе ... 163
5.3. Понятие об интерфейсе связи. Типы интерфейсов ... 166
5.4. Типы и характеристики запоминающих устройств ... 169
5.5. Понятие о контроллерах внешних устройств ... 176
5.6. Принципы обмена цифровой информацией ... 178
5.7. Цифровые способы обработки сигналов с наложенной помехой. Программная реализация фильтра низких частот ... 183

Глава 6. Технические средства автоматизации ... 190
6.1. Общие сведения об измерениях и измерительной технике ... 190
6.2. Автоматизированный контроль параметров технологических процессов ... 196
6.3. Исполнительные механизмы и регулирующие органы систем промышленной автоматизации ... 220
6.4. Технологические контроллеры систем автоматизации ... 225

Глава 7. Моделирование объектов и систем управления ... 243
7.1. Понятие математической модели. Классификация моделей и виды моделирования ... 243

7.2. Технические и программные средства моделирования. Моделирование типовых элементарных звеньев линейных систем в программной среде VisSim 252

Перечень сокращений 261

Список литературы 264

Учебное издание

Андреев Сергей Михайлович,
Парсункин Борис Николаевич

Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов

Учебное пособие

Редактор *Л. В. Честная*
Компьютерная верстка: *Л. М. Беляева*
Корректор *О. Н. Яковлева*

Изд. № 101116895. Подписано в печать 25.08.2015. Формат 60 × 90/16.
Гарнитура «Балтика». Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,0.
Тираж 1 200 экз. Заказ №

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.
Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.
Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 16679 от 25.05.2015.

Отпечатано в Идел-Пресс.