

66  
К 18



*Для профессионально-технических училищ*

**А.Н. КАМРАЗЕ  
М.Я. ФИТЕРМАН**

# **Контрольно- измерительные приборы и автоматика**

• ХИМИЯ •

66  
K 18



*Для профессионально-технических училищ*

**А.Н. КАМРАЗЕ  
М.Я. ФИТЕРМАН**

---

# **Контрольно- измерительные приборы и автоматика**

Издание второе,  
переработанное и дополненное

Одобрено Ученым советом  
Государственного комитета СССР  
по профессионально-техническому образованию  
в качестве учебника для средних  
профессионально-технических училищ

ЛЕНИНГРАД  
«ХИМИЯ»  
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
1988

ББК 6П7.1

К 18

УДК 65.011.56 (07)

Рецензенты: канд. техн. наук *В. Б. Боголюбов*, преподаватель СПТУ  
№ 14 г. Кирово-Чепецка *В. П. Дьячков*

**Камразе А. Н., Фитерман М. Я.**

**К18** Контрольно-измерительные приборы и автоматика:  
Учебник для средних ПТУ.— 2-е изд., перераб. и доп.—  
Л.: Химия. 1988. 224 с.: ил.

ISBN 5—7245—0029—9

Рассмотрены основы автоматизации технологических процессов химических производств (1-е изд.— 1980г.). Приведены сведения по устройству и применению контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации, методам и приборам для измерения состава и свойств веществ, системам управления процессами химической промышленности.

Для учащихся средних профессионально-технических и технических училищ, готовящих аппаратчиков и операторов по обслуживанию автоматизированных процессов химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и микробиологической промышленности. Может быть использован при профессиональном обучении рабочих на производстве.

К  $\frac{2801000000-051}{050(01)-88}$  51—88

ББК 6П7.1

УЧЕБНИК

**Александр Наумович Камразе  
Михаил Яковлевич Фитерман**

## **Контрольно-измерительные приборы и автоматика**

Редактор **В. И. Позина**  
Техн. редактор **З. Е. Маркова**  
Корректор **Л. С. Александрова**

ИБ № 2191

Сдано в набор 23.03.87. Подписано в печать 06.11.87. М-24299. Формат бумаги 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага тип. № 2. Литературная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 14,0. Уч.-изд. л. 14,89. Усл. кр.-отт. 14,31. Тираж 50 000 экз. Зак. 529. Цена 40 коп. Изд. № 3134.

Ордена «Знак Почета» издательство «Химия», Ленинградское отделение  
191186, Ленинград, Д-186. Невский пр., 28.

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29.

© Издательство «Высшая школа», 1980 г.  
© Издательство «Химия», 1988 г.,  
с изменениями

ISBN 5—7245—0029—9

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Автоматизация производства призвана коренным образом преобразовать рабочие места, сделать труд более производительным, творческим и привлекательным. Это одна из важнейших социальных задач, на которую указал XXVII съезд КПСС.

На современном этапе развития химической промышленности невозможно управлять производством без его автоматизации. Высокие температуры, давления, скорости химических реакций, большие объемы аппаратов, зависимость технико-экономических показателей производства от большого числа разнообразных факторов — все это предъявляет высокие требования к управлению производством. Если человек раньше с успехом справлялся с задачами управления, то теперь он этого сделать не может из-за своих ограниченных возможностей: утомляемости, субъективности в оценке возникающих ситуаций, ограниченной скорости реакции на резкие изменения режимных параметров процесса и т. п. В результате функции управления в химических производствах все в большем объеме передаются автоматическим устройствам. В двенадцатой пятилетке уровень автоматизации должен возрасти в 2 раза\*.

На современном производстве от оператора требуются знания не только технологии и оборудования, но и автоматических устройств контроля и управления: от простейших приборов до управляющих вычислительных машин. Оператор должен уметь за показаниями измерительных приборов «видеть» ход технологического процесса, скрытого за стенками реакторов, колонн и аппаратов, вмешиваться при необходимости в работу автоматических регуляторов, устранять простейшие неисправности. Все это невозможно сделать без знания основных принципов управления технологическими процессами, особенностей устройства и эксплуатации приборов, регуляторов и других средств автоматизации. Изучение всех этих вопросов предусмотрено в курсе «Контрольно-измерительные приборы и автоматика».

В основе книги лежат два основных положения. Первое — обратная связь является главным средством решения практически всех задач автоматизации, как простых (измерение), так и сложных (управление). Поэтому изложение материала начи-

---

\* Материалы XXVII съезда Коммунистической партии Советского Союза. М.: Политиздат, 1986. С. 280, 281.

нается с принципов построения автоматических систем управления и регулирования, где особое внимание уделяется роли обратной связи. Далее, в главах, посвященных техническим средствам автоматизации (промежуточным преобразователям, измерительным приборам, регуляторам, исполнительным механизмам), все они рассмотрены как следящие системы с отрицательной обратной связью. Ее применение иллюстрируется приводимыми в каждом случае структурными схемами, единообразие которых показывает, что для решения разнообразных практических задач используется одно и то же техническое решение.

Второе положение — все средства автоматики состоят из элементарных устройств, выполняющих простейшие функции: усиление и суммирование сигналов, преобразование одних сигналов в другие и т. п. В результате оказывается возможным из небольшого числа типовых элементов, имеющих унифицированные входные и выходные сигналы, получить многочисленные автоматические устройства (такой же принцип положен в основу детской игры «Конструктор»).

Кроме основных тем, предусмотренных программой, во втором издании рассмотрены дополнительные вопросы, показывающие многообразие решаемых автоматическими устройствами задач (микропроцессорные регуляторы, особые виды АСР, назначение и функции АСУТП, технические средства АСУТП).

В конце каждого параграфа приведены контрольные вопросы, на которые нет прямых ответов в тексте. Поэтому чтобы ответить на них, нужно не просто понять и запомнить приведенный в учебнике материал, но и уметь им пользоваться для решения практических задач.

## ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

### § 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ УПРАВЛЕНИЯ

Промышленное производство обычно подразделяется на ряд технологических процессов. Под *технологическим процессом* понимают такую переработку сырья и полуфабрикатов, которая приводит к изменению их физических и химических свойств и превращению в готовую продукцию. Иными словами, технологический процесс — совокупность механических, физико-химических и других процессов целенаправленной переработки сырья и полуфабрикатов.

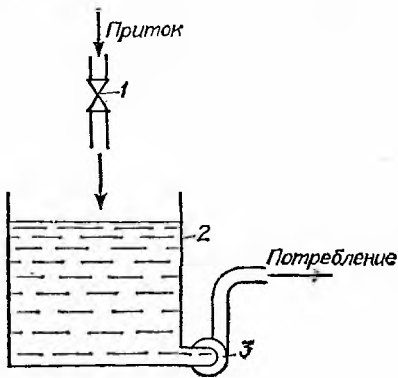
Примером технологического процесса является выпаривание раствора щелочи на выпарной станции для повышения его концентрации. Исходный полуфабрикат в этом процессе — слабый раствор щелочи, а продукция — крепкий раствор. Слабый раствор, проходя через последовательную цепь выпарных аппаратов, постепенно увеличивает свою концентрацию за счет испарения воды и превращается в крепкий раствор щелочи заданной концентрации.

Каждый технологический процесс характеризуется определенными *технологическими параметрами*, которые могут изменяться во времени. В химической технологии такими параметрами являются расход материальных и энергетических потоков, химический состав, температура, давление, уровень вещества в технологических аппаратах и др. Совокупность технологических параметров, полностью характеризующих данный технологический процесс, называется *технологическим режимом*.

Каждый технологический процесс в общем цикле производства имеет свое целевое назначение, в соответствии с которым к нему предъявляют определенные требования — обеспечение заданной или максимальной производительности, заданного или наилучшего качества продукции, заданных или минимальных затрат сырья (полуфабрикатов) и энергии на единицу готовой продукции и т. п. Так, целью технологического процесса выпаривания раствора на выпарной станции является увеличение концентрации полезного компонента в растворе. Поэтому к процессу выпаривания можно предъявить требование обеспечения заданного расхода и концентрации крепкого раствора (производительность и качество продукции) при минимальном расходе греющего пара (энергии) или заданного расхода и максимальной концентрации крепкого раствора при заданном расходе греющего пара.

Рис. 1 Емкость с притоком и потреблением жидкости:

1 — клапан; 2 — емкость (бак); 3 — насос.



Выполнение требований, предъявляемых к технологическому процессу, возможно лишь при целенаправленном воздействии на его технологический режим.

Любой технологический процесс подвержен действию различных факторов, случайных по своей природе, которые нельзя заранее предусмотреть. Такие фак-

торы называются *возмущениями*. К ним относятся, например, случайные изменения состава сырья, температуры теплоносителя, характеристик технологического оборудования и др. Возмущающие воздействия на технологический процесс вызывают изменения технологического режима, что, в свою очередь, приводит к изменению таких технико-экономических показателей процесса, как производительность, качество продукции, расход сырья и энергии и т. п. Поэтому для обеспечения заданных (требуемых) технико-экономических показателей необходимо компенсировать колебания технологического режима, вызванные действием возмущений. Такое целенаправленное воздействие на технологический процесс представляет собой *процесс управления*. Совокупность требований, осуществляемых в процессе управления, называется *целью управления*. Наконец, сам управляемый технологический процесс вместе с технологическим оборудованием, в котором он протекает, является *объектом управления*.

Объект управления и устройства, необходимые для осуществления процесса управления, называются *системой управления*.

В качестве примера рассмотрим управление уровнем жидкости в емкости (баке) 2, имеющей входной и выходной потоки, которые называются соответственно приток и потребление (рис. 1). При случайных (заранее неизвестных) колебаниях потребления, например за счет изменения производительности насоса 3, для управления уровнем следует воздействовать на приток, изменяя степень открытия клапана 1. Здесь целью управления является поддержание постоянного уровня жидкости в емкости, а целенаправленное воздействие на приток представляет собой процесс управления. Объект управления в этом примере — емкость с притоком и потреблением и протекающий в ней процесс изменения уровня жидкости.

### Контрольные вопросы

1. Что такое технологический режим?
2. Что такое процесс управления технологическим процессом?

3. Какое влияние оказывают возмущения на технологический процесс?
4. Что является объектом управления?
5. Что является целью управления?

## § 2. ИЕРАРХИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Современные процессы химической технологии весьма сложны и характеризуются большим числом технологических параметров, прямо или косвенно влияющих на их технико-экономические показатели. Поэтому управление химико-технологическими процессами организуют по так называемому иерархическому принципу.

*Иерархический принцип управления* заключается в многоступенчатой организации процесса управления, где каждая ступень управления имеет свои объекты и цели управления.

Поясним сущность иерархического принципа управления технологическим процессом. Обычно целью управления является достижение заданных технико-экономических показателей процесса. Ясно, что эти показатели зависят от технологического режима процесса. Технологический режим, при котором достигаются заданные показатели, называется *оптимальным*. Но, как указывалось, технологический режим изменяется под действием случайных возмущений и поэтому может существенно отклоняться от оптимального. Понятно, что любые отклонения технологического режима от оптимального только ухудшают его технико-экономические показатели. Следовательно, необходимо непрерывно поддерживать технологические параметры процесса как можно ближе к их оптимальным значениям.

Управление технологическим процессом можно организовать в виде двух ступеней. На верхней ступени цель управления заключается в отыскании оптимального режима технологического процесса. Объектом управления при этом является весь технологический процесс с технологическим оборудованием. Тогда цель управления на нижней ступени — обеспечение минимальных отклонений технологических параметров от их оптимальных значений. Эта цель достигается относительно легко и заключается в *стабилизации технологических параметров*. В данном случае вместо термина «управление» часто применяют «регулирование».

На нижней ступени технологический процесс рассматривают как совокупность простых (элементарных) процессов, которые вместе с технологическими аппаратами, где они протекают, представляют собой объекты регулирования данной ступени.

При подобной организации процесса управления найденные на верхней ступени оптимальные значения технологических параметров можно рассматривать как «руководящие указания» для нижней, т. е. нижняя ступень управления подчинена верхней в общем процессе управления. Поэтому такие ступени процесса управления называют *иерархическими уровнями управления*.



Мы рассмотрели управление отдельными технологическими процессами с целью получения заданных технико-экономических показателей. Однако при управлении всем предприятием возникают такие цели и задачи управления, которые нельзя отнести к отдельным технологическим процессам. Это задачи оперативного управления цехами, организации производства, планирования запасов сырья, полуфабрикатов и готовой продукции и т. п. Поэтому процесс управления предприятием должен включать еще один уровень, где решаются указанные задачи. Он является высшим иерархическим уровнем.

Таким образом, структура управления современным промышленным предприятием характеризуется тремя уровнями иерархии управления (рис. 2). Нижний уровень (I) представлен так называемыми локальными системами регулирования, функции которых сводятся к стабилизации отдельных технологических параметров. Такие простые задачи решаются автоматическими устройствами без участия человека, и поэтому системы регулирования нижнего иерархического уровня называются *автоматическими системами регулирования (АСР)*. Объекты регулирования на этом уровне — элементарные процессы с соответствующими технологическими аппаратами.

Следующий иерархический уровень (II) образуют системы управления технологическими процессами. Объектами управления на этом уровне являются уже целые технологические процессы вместе с технологическим оборудованием и локальными АСР. Здесь решаются задачи оптимизации технологических режимов процессов. Кроме того, в функции управления на этом уровне входит выявление и устранение ненормальных (аварийных) режимов, переключение оборудования в технологических схемах, вычисление технико-экономических показателей процессов и т. п. Указанные функции управления относительно сложны и не могут быть целиком возложены на автоматические устройства. Поэтому в системах управления технологическими процессами применяют управляющие вычислительные машины (УВМ), а в процессах управления участвует оператор УВМ. Такие системы управления получили название *автоматизиро-*

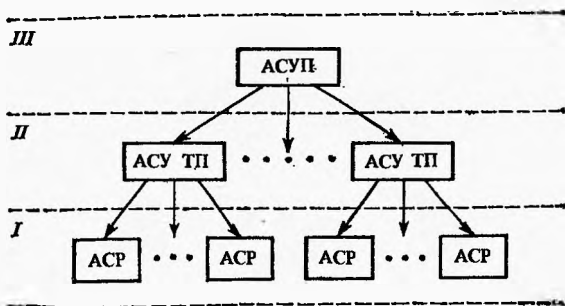


Рис. 2. Иерархия управления предприятием.

*ванных систем управления технологическими процессами (АСУТП).*

На высшем иерархическом уровне (III) осуществляется управление всем предприятием. Объектом управления здесь является все производство и оборудование (включая вспомогательные службы: снабжения, сбыта, ремонтные, конструкторские и т. п.), а также АСУТП предыдущего иерархического уровня. Здесь решаются задачи управления всем производством в целом с применением УВМ и участием операторов. Система управления этого уровня получила название *автоматизированной системы управления предприятием (АСУП).*

Из сказанного видна роль локальных АСР нижнего иерархического уровня в общем процессе управления промышленным предприятием: они являются периферийными органами управления, через которые реализуются решения, принимаемые в процессе управления на более высоких иерархических уровнях.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается иерархический принцип управления?
2. Каковы цели управления на различных иерархических уровнях?
3. Что является объектом управления на разных уровнях управления технологическим процессом?
4. Почему системы управления нижней ступени иерархии могут работать в автоматическом режиме, т. е. без участия человека, а на верхних ступенях участие человека в процессе управления необходимо?
5. Какова роль локальных АСР при управлении промышленным предприятием?

### **§ 3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Все процессы управления, и в частности регулирования, имеют общие закономерности, не зависящие от конкретных целей и объектов управления.

Чтобы уяснить общие принципы управления, рассмотрим несколько примеров.

Проследим действия водителя за рулем автомобиля. Водитель видит перед собой дорогу и следит, куда идет машина и насколько она отклоняется от заданного направления. На основании этих наблюдений он решает, куда и насколько следует повернуть руль. Поворот руля возвращает автомобиль к заданному направлению движения.

Мы видим, что в процессе управления автомобилем можно выделить следующие основные составляющие. Во-первых, наблюдая за дорогой, водитель получает информацию о заданном (требуемом) направлении движения. Однако водителю недостаточно только наблюдать за дорогой, он должен видеть, куда идет машина. Следовательно, во-вторых, водитель получает информацию о фактическом движении автомобиля. В-третьих, на основании полученной информации он определяет, в какую сторону и насколько отклонился автомобиль от заданного

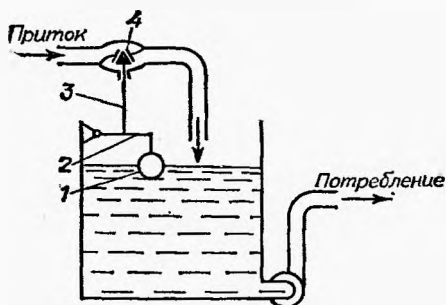


Рис. 3. Автоматическое регулирование уровня в емкости:

1 — поплавок; 2 — рычаг; 3 — шток; 4 — клапан.

руля водитель изменяет направление движения автомобиля.

В качестве другого примера рассмотрим процесс регулирования уровня в емкости при произвольно изменяющемся потреблении жидкости (см. рис. 1).

Стабилизировать уровень на заданном значении можно изменением притока в зависимости от отклонения уровня от заданного значения. Пусть вначале уровень в емкости постоянный и равен заданному. Случайное уменьшение потребления вызовет отклонение уровня выше заданного. Тогда прикрывают клапан на притоке. При отклонении уровня ниже заданного значения клапан, наоборот, больше приоткрывают.

Этот процесс регулирования также состоит из пяти составляющих. Во-первых, получение информации о заданном значении уровня. В данном случае это значение заранее известно. Во-вторых, получение информации о фактическом уровне, т. е. его измерение. В-третьих, определение величины и знака отклонения уровня от заданного. В-четвертых, установление требуемого изменения притока в зависимости от величины и знака отклонения. В-пятых, изменение притока открытием или закрытием клапана.

В обоих рассмотренных примерах процесс управления был неавтоматическим: в нем принимал участие человек. В АСР процесс управления осуществляется автоматически. Так, регулировать уровень в емкости автоматически можно, например, с помощью АСР, показанной на рис. 3. Поплавок 1 в этой системе перемещается вместе с уровнем, а клапан 4 изменяет расход на притоке. Поплавок связан с клапаном через поворотный рычаг 2 и прикрепленный к нему шток 3.

В такой АСР любое отклонение уровня от заданного, вызванное колебаниями потребления, приведет к перемещению поплавка и связанного с ним клапана. При отклонении уровня выше заданного клапан будет прикрываться, а при отклонении ниже заданного, наоборот, приоткрываться. Таким образом, в этой системе все указанные составляющие процесса регулирования выполняются автоматически: при отклонении уровня от заданного значения поплавки отклоняет рычаг, а перемещение штока изменяет степень открытия клапана и приводит тем самым к требуемому изменению притока.

Из рассмотренных примеров видно, что для управления любым объектом необходимо получить информацию о заданном и фактическом его состоянии, определить отклонение фактического состояния от заданного, на основе этого выработать целенаправленное воздействие на объект и осуществить его.

Несмотря на огромное разнообразие встречающихся в технике объектов, отмеченный общий характер процессов управления не зависит от физической природы объектов и технических средств управления. Так, действия любого водителя за рулем любой автомашины и на любой дороге носят в принципе одинаковый характер. Процесс регулирования уровня в емкости также не зависит от конфигурации емкости, расположения трубопроводов, природы жидкости, конструкции клапана и т. п. Это позволяет изучать закономерности управления в общем виде, независимо от природы объектов управления и протекающих в них технологических процессов. Такие общие закономерности изучает *теория управления*. Рассмотрим основные термины и понятия теории управления.

Как отмечалось, любой процесс управления складывается из пяти основных действий. В АСР эти действия выполняют технические устройства. Устройство для получения информации о состоянии объекта управления называется *измерительным устройством*. Устройство, которое определяет отклонение измеренного значения параметра от заданного, называется *сумматором*. Сумматор производит алгебраическое суммирование — вычитание измеренного значения параметра из заданного. Устройство, вырабатывающее необходимое воздействие на объект, называется *регулятором*. Для передачи этого воздействия на объект служит *регулирующий орган*. Обычно для перемещения регулирующего органа применяется отдельное устройство — *исполнительный механизм*. Все эти устройства, а также объект управления являются элементами АСР. В промышленных системах некоторые из перечисленных устройств бывают конструктивно совмещены, например, сумматор может быть частью регулятора, а исполнительный механизм объединен с регулирующим органом.

Нетрудно убедиться, что во втором примере объектом регулирования является емкость с притоком и потреблением жидкости, измерительным устройством — поплавком, рычаг выполняет роль сумматора и регулятора, а клапан — регулирующего органа.

Структурная схема этой АСР, показывающая взаимосвязь ее элементов, приведена на рис. 4. Как видно из схемы, элементы АСР связаны между собой таким образом, что воздействуют друг на друга: измерительное устройство воздействует через сумматор на регулятор, регулятор — на регулирующий орган, регулирующий орган — на объект регулирования. Эти воздействия передаются от одного элемента к другому посредством *сигналов*.



Рис. 4. Структурная схема АСР уровня в емкости.

Физическая природа сигналов может быть различной: электрической, пневматической, механической. Так, в рассматриваемой АСР применена механическая связь регулятора с измерительным устройством и регулирующим органом. Общим свойством любых сигналов является передача воздействия от одних элементов системы к другим. Например, при регулировании уровня в емкости регулирующий орган воздействует на объект регулирования изменением притока в емкость. Здесь сигналом является расход жидкости на притоке.

Передача воздействия от одного элемента к другому всегда происходит в одном направлении: от предыдущего к последующему. Поэтому еще одним общим свойством сигналов является их направленность. В соответствии с этим для каждого элемента АСР различают *входные* и *выходные сигналы*. Выходной сигнал элемента является его реакцией на входной сигнал. Иначе говоря, выходной сигнал элемента зависит от его входного сигнала.

В общем случае элемент АСР может иметь несколько входных и выходных сигналов. Например, для регулирующего органа в АСР уровня в емкости входной сигнал — степень открытия клапана, а выходной — расход жидкости через него. Для самой емкости с жидкостью как объекта регулирования входными сигналами являются расходы на притоке и потреблении; зависящий от этих сигналов уровень в емкости — выходной сигнал.

Входные и выходные сигналы объектов регулирования могут не совпадать с входными и выходными потоками вещества и энергии. Так, в емкости, изображенной на рис. 3, приток является входным, а потребление — выходным потоком. Вообще следует помнить, что в процессах управления конструкция элементов, материалы, из которых они изготовлены, природа выходных и входных сигналов и тому подобные факторы не играют существенной роли в процессах регулирования. Имеет значение лишь характер преобразования входных сигналов в выходные,

Среди элементов АСР особое место занимает объект регулирования. Это объясняется тем, что характер преобразования сигналов в объекте и сами эти сигналы predeterminedены назначением объекта в технологическом процессе и не могут быть изменены. Например, назначение рассмотренной емкости с притоком и потреблением — создание запаса жидкости. Поэтому при разработке АСР объект рассматривают как элемент с заранее заданными свойствами. Свойства же остальных элементов системы и способы их соединения между собой можно изменять.

Состояние объекта в каждый момент времени характеризуется его выходными сигналами. Управлять объектом — значит управлять его выходными сигналами, в частности стабилизировать их. Стабилизируемые сигналы объекта получили название *регулируемых параметров*. В химической технологии типичными регулируемыми параметрами являются уровень, давление, расход, концентрация, плотность, температура.

Заданное значение регулируемого параметра при его стабилизации называется иногда просто *заданием*, а разность между заданным и измеренным значениями регулируемого параметра — *рассогласованием*. Рассогласование, таким образом, характеризует отклонение регулируемого параметра от его задания, т. е. качество стабилизации.

Для воздействия на выходные сигналы (регулируемые параметры) объекта необходимо иметь возможность целенаправленно изменять его входные сигналы. Такие входные сигналы объекта называют *регулирующими параметрами*, а их целенаправленное изменение — *регулирующим воздействием*. Так, регулируемым параметром емкости является уровень жидкости в ней, а регулирующим — расход на притоке. Вообще в химико-технологических процессах расходы вещества (жидкостей, газов, паров и т. п.) и энергии (электрической, тепловой и т. п.) — наиболее распространенные регулирующие параметры объектов.

Реальные объекты всегда подвергаются в той или иной мере действию различных возмущений. В технологических процессах возмущения — это случайные факторы, которые нарушают нормальный технологический режим. Так, при регулировании уровня в емкости основными возмущениями являются колебания потребления, которые приводят к отклонению уровня от заданного значения. Другой пример: для помещения, в котором температура стабилизируется водяным отоплением, возмущениями будут колебания температуры воды в батарее, наружного воздуха и т. п.

Возмущения могут воздействовать не только на объект регулирования, но и на любой другой элемент системы. Например, к возмущениям следует отнести износ клапана, т. е. возмущение, действующее на регулирующий орган.

Общее свойство любых возмущений — воздействие на элементы АСР, что вызывает случайные изменения их выходных сигналов. Поэтому возмущения всегда являются входными сигналами элементов.

### Контрольные вопросы

1. Покажите на структурной схеме АСР (рис. 4) сигналы, соответствующие пяти составляющим процесса регулирования.
2. Из каких элементов состоит АСР? Как они связаны между собой?
3. Каковы общие свойства сигналов АСР?
4. В чем разница между входными и выходными материальными потоками технологических аппаратов и входными и выходными сигналами этих аппаратов как объектов регулирования?
5. Каково назначение регулирующего параметра?
6. Что является для автомобиля как объекта управления регулируемым параметром? Регулирующим параметром? Какие возмущения могут влиять на движение автомобиля?
7. Назовите элементы, из которых состоит система управления автомобилем. Функции каких элементов выполняет водитель?
8. Нарисуйте структурную схему системы управления движением автомобиля с обозначением элементов схемы и действующих сигналов. Сравните ее со структурной схемой автоматической системы регулирования уровня в емкости и найдите, в чем между ними сходство и различие.
9. Нарисуйте структурную схему автоматической системы регулирования температуры утюга; температуры в холодильнике.

### § 4. ВИДЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В технологических процессах, как указывалось, действие возмущений приводит к отклонению фактического технологического режима от заданного (оптимального). Для компенсации возмущающих воздействий и предназначены АСР технологических параметров. Иначе говоря, назначение АСР — устранить отклонение регулируемого параметра от его задания, т. е. рассогласование, вызываемое возмущениями.

Процесс регулирования в АСР может осуществляться двумя способами или их комбинацией. Рассмотрим первый способ.

Если бы можно было управляющим воздействием скомпенсировать все возмущения, действующие на объект, то его регулируемый параметр вообще не отклонялся бы от задания, т. е. не было бы рассогласования. Эта идея компенсации возмущений на входе объекта лежит в основе способа *регулирования по возмущению*. АСР, реализующая данный способ, называется *АСР по возмущению*. Структурная схема такой АСР приведена на рис. 5, а.

В АСР по возмущению регулируемый параметр  $u$  изменяется в зависимости от возмущения  $v$  таким образом, что регулирующее воздействие компенсирует возмущающее воздействие на объект. Таким способом, например, можно стабилизировать уровень в емкости. Для этого расход жидкости на притоке необходимо поддерживать равным расходу на потреблении. Тогда возмущающее действие колебаний потребления будет устраняться и уровень не изменится.

В промышленности АСР по возмущению обычно не применяют. Это объясняется тем, что в таких АСР нет контроля за рассогласованием и поэтому оно может бесконтрольно увеличиваться под действием неучтенных возмущений. Например, отклонение уровня в емкости от заданного значения с течением времени может увеличиться вследствие неточного измерения расхода, испарения жидкости с поверхности и т. д. С другой стороны, регулирование по возмущению принципиально позволяет устранить возмущающие воздействия на входе объекта до воз-

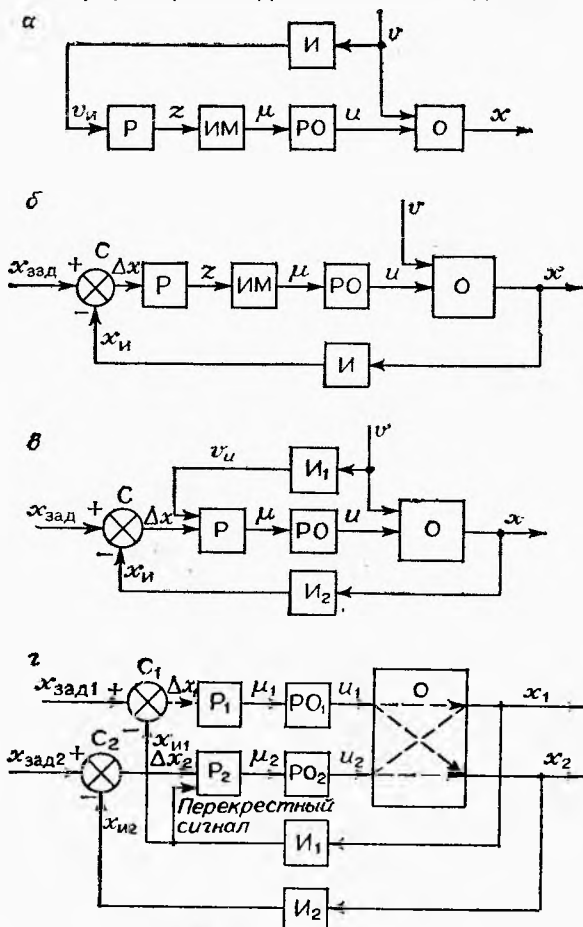


Рис. 5. Структурные схемы АСР:

а — по возмущению; б — по отклонению; в — комбинированная; г — многоконтурная;  $C_1, C_2, C_3$  — сумматоры;  $P_1, P_2$  — регуляторы; ИМ — исполнительный механизм;  $PO_1, PO_2$  — регулирующие органы;  $O$  — объект;  $I_1, I_2$  — измерительные устройства;  $x_{зад}, x_{зад1}, x_{зад2}$  — заданные значения регулируемых параметров (задание);  $x, x_1, x_2$  — регулируемые параметры;  $x_{и}, x_{и1}, x_{и2}$  — их измеренные значения,  $\Delta x, \Delta x_1, \Delta x_2$  — рассогласования;  $z$  — выходной сигнал регулятора;  $\mu, \mu_1, \mu_2$  — положения регулирующего органа;  $u, u_1, u_2$  — регулирующие параметры;  $v$  — возмущение;  $v_{и}$  — его измеренное значение.



никновения рассогласования. В этом достоинство данного способа регулирования.

Второй способ регулирования заключается в том, что регулирующий параметр объекта изменяют в зависимости от отклонения регулируемого параметра от задания. Структурная схема АСР, реализующей такой способ, приведена на рис. 5, б. Регулирующий параметр  $u$  при этом способе зависит только от рассогласования  $\Delta x$ . Зависимость выбирается такая, чтобы при любом рассогласовании, вызванном возмущающим воздействием, регулирующее воздействие всегда стремилось уменьшить рассогласование. Этот способ называется *регулированием по отклонению*, а АСР, в которой он используется, — *АСР по отклонению*.

Именно таким способом регулировался уровень в емкости (см. рис. 3). Расход на притоке (регулирующий параметр) изменялся в зависимости от отклонения уровня от заданного значения таким образом, что при возрастании уровня расход на притоке уменьшался, а при его понижении — увеличивался.

Проследим взаимодействие элементов АСР по отклонению по ее структурной схеме.

Выходной сигнал объекта  $x$  воздействует на измерительное устройство, выходной сигнал которого — измеренное значение регулируемого параметра  $x_n$ . Этот сигнал сравнивается в сумматоре с сигналом задания  $x_{зад}$ , и их разность, т. е. сигнал рассогласования  $\Delta x$ , преобразуется в выходной сигнал регулятора  $z$ . Наконец, исполнительный механизм и регулирующий орган преобразуют этот сигнал в регулирующее воздействие на объект — регулирующий параметр  $u$ . Другой входной сигнал объекта представляет собой возмущение  $v$ .

Из структурной схемы АСР по отклонению видно, что сигналы в ней проходят по замкнутому контуру: от сумматора  $S$  через регулятор  $P$ , исполнительный механизм  $ИМ$  и регулирующий орган  $РО$  на вход объекта — в прямом направлении, а с выхода объекта через измерительное устройство  $И$  — в обратном. Такая связь объекта с регулятором называется *обратной*. Можно сказать, что обратная связь в АСР — это прием, с помощью которого осуществляется регулирование по отклонению. Обратная связь как бы замыкает выход АСР (регулируемый параметр) с ее входом (заданием), и поэтому АСР с обратной связью является *замкнутой*.

В замкнутой АСР регулирующее воздействие — реакция на рассогласование, возникающая после появления рассогласования. Это недостаток способа регулирования по отклонению, так как в идеальной АСР рассогласование вообще не должно возникать.

Как известно, причиной рассогласования являются различные возмущения, действующие в АСР. Регулирование с использованием обратной связи уменьшает возникающее рассогласование и тем самым компенсирует результат действия возмущений (но не сами возмущения). При таком регулировании не требуется

информации об источнике, характере и величине возмущений. Благодаря этому важному свойству обратной связи можно управлять любыми реальными объектами при неизвестных возмущениях. В этом преимущество АСР по отклонению перед АСР по возмущению.

Возможно одновременное применение способов регулирования по отклонению и возмущению. Структурная схема такой *комбинированной АСР* дана на рис. 5, в. Она отличается от схемы АСР по отклонению тем, что в регулятор кроме сигнала рассогласования  $\Delta x$  вводится измеренное значение  $v_n$  возмущения  $v$ .

В комбинированной АСР основные возмущения компенсируются регулирующим воздействием на входе объекта, как и в АСР по возмущению. Рассогласование же возникает под действием оставшихся, не основных возмущений, а также ошибок измерения и неточной компенсации основных возмущений. Следовательно, в комбинированной АСР рассогласование будет меньше, чем в АСР по отклонению. Поэтому комбинированные АСР обеспечивают большую точность регулирования, но зато они более сложны.

Сравнивая описанные способы регулирования, можно сделать следующие выводы. Регулирование по возмущению в принципе может полностью устранить рассогласование, т. е. сделать АСР нечувствительной к возмущениям. Однако для этого требуется идеально точное измерение и компенсация всех возмущений, что практически невозможно. Поэтому способ регулирования по возмущению применяется обычно как дополнение к регулированию по отклонению в комбинированных АСР для улучшения их свойств. Для регулирования же по отклонению не требуется информации о возмущениях, поэтому такой способ легко реализуется на практике с помощью обратной связи. Однако по этой же причине в АСР с обратной связью рассогласование принципиально не может быть устранено полностью, ибо регулирующее воздействие на объект осуществляется лишь после возникновения рассогласования, т. е. как бы запаздывает во времени.

Если бы можно было заранее предвидеть возмущения и реакцию объекта на них, то стало бы возможным формирование регулирующего воздействия с необходимым предварением, чтобы не допустить возникновения рассогласования. Оказывается, что о будущем поведении объекта можно судить по скорости изменения рассогласования.

Действительно, если в каждый текущий момент времени измеряется не только само рассогласование, но и скорость его изменения, то можно рассчитать (предсказать) рассогласование на следующий, будущий момент. На вход регулятора АСР тогда подается не текущее, а предсказанное рассогласование, в результате чего регулирующее воздействие производится с необходимым предварением. Таким образом можно еще больше

уменьшить рассогласование. АСР, использующие такой эффект предварения, — это АСР с предварением.

АСР классифицируют не только по способу регулирования, но и по характеру сигналов регулирующего воздействия и сигналов задания. По характеру сигналов регулирующего воздействия различают АСР непрерывные и дискретные. В *непрерывных АСР* регулирующее воздействие может изменяться непрерывно. В *дискретных АСР* регулирующее воздействие может изменяться скачками либо только в определенные моменты времени (дискретность по времени), либо только на определенное значение (дискретность по значению). В первом случае АСР является *импульсной*, во втором — *релейной*.

Импульсные АСР обычно применяют, когда регулируемый параметр измеряется дискретно во времени (например, измерение концентрации раствора путем периодического отбора проб на анализы). В этом случае регулируемый параметр обычно изменяется также дискретно.

В релейной АСР регулируемый параметр может принимать лишь несколько возможных значений. Релейная АСР с двумя возможными значениями регулирующего параметра — *двухпозиционная*, с тремя — *трехпозиционная*. Например, при регулировании температуры в электрической нагревательной печи регулируемый параметр имеет два значения: «нагреватель включен» и «нагреватель выключен».

Задание в АСР может быть постоянной величиной или изменяться во времени. В соответствии с этим АСР делятся на стабилизирующие, программные и следящие.

В *стабилизирующих АСР* задание является постоянной величиной. В *программных АСР* задание изменяется по определенному, заранее заданному закону, а в *следящих АСР* — произвольно. Примером стабилизирующей АСР является система стабилизации уровня в емкости, когда заданное значение уровня постоянно. Примером программной АСР может служить система регулирования температуры в печи для закалки стальных заготовок. Температура здесь должна понижаться по определенному закону во времени. Пример следящей АСР — система регулирования расхода воздуха, подаваемого в форсунку для сжигания топлива. Для обеспечения оптимального режима горения задание на расход этого воздуха изменяют пропорционально расходу топлива.

Следует помнить, что сама стабилизация технологического параметра, как цель регулирования в АСР, предполагает любое изменение задания.

Мы рассматривали АСР, в которых один регулируемый и один регулируемый параметр. В замкнутых АСР они связываются в один контур, образованный прямой и обратной связью, поэтому такие замкнутые АСР называются *одноконтурными* или *односвязными*.

С помощью только односвязных АСР не всегда можно достичь требуемого качества управления технологическими процессами, так как они не учитывают влияния друг на друга регулируемых и регулирующих параметров различных АСР. Поэтому применяют так называемое *связанное регулирование*, учитывающее взаимное влияние параметров. Такое регулирование осуществляется *многоконтурными АСР*.

Многоконтурная АСР может быть представлена в виде совокупности одноконтурных АСР, связанных между собой дополнительными перекрестными сигналами. Пример многоконтурной АСР, состоящей из двух одноконтурных с одним перекрестным сигналом, приведен на рис. 5, а.

### Контрольные вопросы

1. В чем сущность способа регулирования по возмущению? по отклонению?
2. Какой способ регулирования применен в АСР температуры утюга? температуры в холодильнике?
3. Какой способ регулирования применяет водитель автомобиля?
4. Как будут влиять неизмеряемые возмущения на величину рассогласования в АСР по возмущению? в АСР по отклонению?
5. В чем достоинства и недостатки АСР по возмущению? АСР по отклонению?
6. Что такое обратная связь? В каких АСР (по возмущению или по отклонению) она используется? Какова ее роль в процессе регулирования?
7. Чем обеспечивается большая точность регулирования в комбинированных АСР?
8. Почему в АСР по отклонению может возникать запаздывание регулирующего воздействия и как это сказывается на точности регулирования?
9. Как можно уменьшить влияние запаздывания в АСР?
10. Чем отличается импульсная АСР от релейной и они обе от непрерывной АСР?
11. Чем отличается программная АСР от следящей и они обе от стабилизирующей АСР?
12. Назовите типы АСР уровня в емкости и температуры утюга по способу регулирования, по характеру регулирующего воздействия, по сигналам задания.

### § 5. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Обратная связь, как было объяснено в § 4, является универсальным приемом, позволяющим эффективно управлять объектами в условиях случайных возмущающих воздействий. Обратная связь используется во многих отраслях техники, в частности в измерительной. Более того, обратная связь применялась еще задолго до открытия способа управления по отклонению.

Можно привести такой простой пример. Протягивая руку, чтобы взять какой-либо предмет, мы подсознательно управляем движением руки, устраняя ошибки при ее приближении к предмету. Чтобы убедиться, что такое управление действительно имеет место, достаточно разорвать цепь обратной связи: попытаться взять предмет с завязанными глазами.

Для выяснения сущности обратной связи проанализируем подробно процесс регулирования в замкнутой АСР по отклонению.

Рассмотрим действие обратной связи в АСР уровня в емкости (см. рис. 3 и 4). Пусть первоначально расходы на притоке и потреблении одинаковы, а уровень равен заданному. Если возникнет случайное возмущение, например потребление уменьшится, то уровень начнет расти. Если бы обратной связи не существовало, т. е. поплавков не был связан с клапаном, рост уровня продолжался бы все время, пока потребление из емкости было меньше притока, вплоть до ее переполнения. Действие же обратной связи приводит к тому, что по мере роста уровня клапан будет все больше и больше прикрываться, уменьшая тем самым расход на притоке.

Этот расход будет уменьшаться до тех пор, пока не прекратится рост уровня, т. е. снова не наступит равенство притока и потребления. Таким образом, в результате действия обратной связи рост уровня, вызванный возмущением со стороны потребления, прекратится. При этом положение клапана будет отличаться от первоначального (он будет больше прикрыт), а так как клапан жестко связан с поплавком, измеряющим уровень, то и значение уровня станет иным, чем заданное. Отсюда следует, что такая АСР уровня компенсирует вредное действие возмущения не полностью: рост уровня прекращается, но он не возвращается к заданному значению.

Существуют системы, в которых этот недостаток удается устранить. В качестве примера рассмотрим АСР давления в воздушном ресивере с притоком и потреблением воздуха. Принципиальная схема этой системы приведена на рис. 6, а взаимодействие ее элементов можно проследить по структурной схеме, которая дана на рис. 5, б.

Цель управления здесь — стабилизация давления в ресивере воздействием на расход воздуха на притоке. Объектом в системе является ресивер 1 с притоком и потреблением, регулируемым параметром  $x$  — давление в ресивере, регулирующим  $u$  — расход

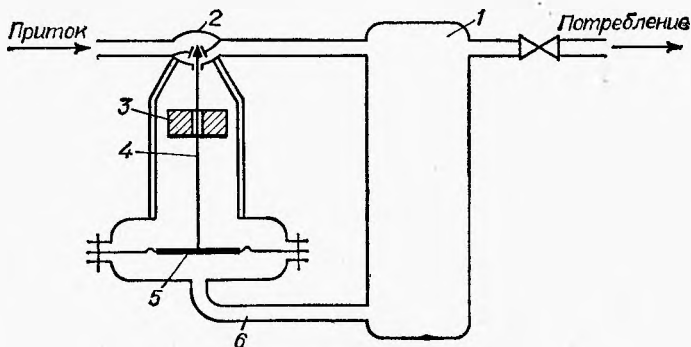


Рис. 6. Автоматическое регулирование давления воздуха в ресивере:

1 — ресивер; 2 — клапан; 3 — груз; 4 — шток; 5 — мембрана; 6 — соединительная трубка.

воздуха на притоке, возмущением  $v$  — расход воздуха на потреблении.

Расход на притоке изменяется клапаном 2, являющимся регулирующим органом. Функцию измерительного устройства выполняет мембрана 5, роль сумматора и регулятора — шток 4. Заданное значение давления  $x_{зад}$  определяется весом груза 3.

Давление в ресивере через трубку 6 действует снизу на мембрану 5 и создает на ней и, следовательно, на штоке усилие, пропорциональное измеряемому давлению и направленное вверх. Это усилие сравнивается с весом груза, также действующим на шток, но направленным вниз. Результирующее усилие на штоке является рассогласованием  $\Delta x$  и вызывает его перемещение. В результате изменяется степень открытия клапана  $\mu$ , а значит, и расход воздуха на притоке, т. е. регулирующий параметр  $u$ .

Пусть в начальный момент времени давление в ресивере равно заданному. Тогда усилие на мембране уравнивается весом груза, и поэтому результирующее усилие на штоке равно нулю. Шток при этом неподвижен и занимает такое положение, при котором приток равен потреблению. Тогда давление в ресивере не будет изменяться.

Предположим, что расход потребляемого воздуха уменьшился, т. е. в системе возникло возмущение. Тогда количество воздуха в ресивере начнет увеличиваться и давление в нем будет возрастать. Это приведет к увеличению усилия, действующего на мембрану со стороны измеряемого давления. В результате шток начнет перемещаться вверх, а клапан прикрываться, уменьшая приток воздуха в ресивер. Перемещение штока и уменьшение притока воздуха будут продолжаться до тех пор, пока усилия на штоке не уравниваются. Так как вес груза не изменился, то при уравнивании усилий на штоке давление в ресивере вернется к заданному значению.

Таким образом, в рассмотренной АСР регулирующее воздействие осуществляется до тех пор, пока не исчезнет рассогласование. Способность этой системы, в отличие от АСР уровня в емкости, устранять рассогласование, вызванное случайными возмущениями, является ее важной особенностью.

Из рассмотренных примеров видно, что действие обратной связи направлено на уменьшение рассогласования независимо от того, какими причинами оно вызвано. Убедимся теперь, что это свойство обратной связи проявляется в любой АСР по отклонению. Для этого рассмотрим структурную схему АСР по отклонению (см. рис. 5, б).

Предположим, что сначала все сигналы в системе постоянны. Если под действием каких-либо возмущений регулируемый параметр  $x$  начнет изменяться, то будет изменяться и рассогласование  $\Delta x$ . Регулятор станет реагировать на изменение рассогласования и через регулирующий орган изменять регулируемый параметр  $u$ . Регулирующее воздействие на объект будет стремиться вернуть регулируемый параметр  $x$  к его

первоначальному значению, компенсируя тем самым действие возмущения. Этот процесс в АСР не прекратится до тех пор, пока регулируемый параметр не перестанет изменяться, так как любое его изменение преобразуется сумматором  $C$ , регулятором  $P$ , исполнительным механизмом  $ИМ$  и регулирующим органом  $РО$  в регулирующее воздействие на объект.

Итак, в любой АСР возмущение стремится вывести ее из состояния равновесия, а действие обратной связи — вернуть к нему. Под *состоянием равновесия*, или *установившимся состоянием* понимают такое состояние системы управления, при котором отсутствуют возмущающее и регулирующее воздействия, и поэтому все ее сигналы остаются неизменными во времени. Аналогично определяется состояние равновесия отдельных элементов системы: объекта, регулятора и т. д. Любое другое состояние системы или ее элементов называется *неустановившимся*.

Используя понятие равновесия системы управления, можно сформулировать основное различие рассмотренных АСР уровня в емкости и давления в ресивере. АСР давления, независимо от величины возмущающего воздействия, всегда стремится к одному и тому же состоянию равновесия, в котором рассогласование между регулируемым параметром и его заданием равно нулю. В АСР уровня состояние равновесия зависит от величины возмущающего воздействия и поэтому рассогласование может быть и не нулевым. В первом случае регулятор и сама АСР называются *астатическими*, а во втором — *статическими*.

Установившееся рассогласование в состоянии равновесия АСР называется *остаточным отклонением* или *статической ошибкой регулирования*.

Любой астатический регулятор обладает следующим характерным свойством: его выходной сигнал непрерывно изменяется, пока на его входе имеется ненулевое рассогласование, и становится постоянным лишь после исчезновения рассогласования. Таким образом, состоянию равновесия астатического регулятора соответствует нулевой входной сигнал, а его выходной сигнал при этом может иметь любое значение.

Чтобы регулятор был астатическим, он должен содержать элемент, обладающий указанной реакцией на входной сигнал. Такой элемент называется *интегратором*. Он не обязательно должен быть частью конструкции регулятора: иногда функцию интегратора выполняет исполнительный механизм.

В статическом регуляторе состояние равновесия может быть достигнуто и при ненулевом входном сигнале. При этом выходной сигнал регулятора однозначно связан с входным: каждому значению установившегося рассогласования соответствует одно определенное значение установившегося выходного сигнала.

Так, в астатическом регуляторе АСР давления в ресивере (см. рис. 6) шток 4 будет непрерывно перемещаться, пока результирующее усилие на нем не станет равным нулю. В момент уравнивания на штоке усилий со стороны мембраны 5 и

груза 3 он остановится в произвольном положении. Следовательно, здесь шток выполняет функцию интегратора. В статическом регуляторе АСР уровня в емкости (см. рис. 3) в момент уравнивания каждому углу поворота рычага 2 соответствует определенное положение штока 3.

До сих пор рассматривалась такая обратная связь в АСР, при которой регулирующее воздействие, вызванное рассогласованием, приводит к его уменьшению. Такая обратная связь называется *отрицательной*. Возможно и противоположное действие обратной связи, когда первоначальное рассогласование в АСР увеличивается. Такая обратная связь называется *положительной*.

Если в рассмотренных АСР изменить конструкцию клапана таким образом, чтобы при движении штока вверх он открывался, а при движении вниз — закрывался, то обратная связь станет положительной.

Очевидно, что положительная обратная связь противоречит основному назначению АСР — уменьшению рассогласования. Поэтому такая обратная связь применяется только для вспомогательных целей (например, для коррекции свойств отдельных элементов АСР).

### Контрольные вопросы

1. Может ли обратная связь в АСР полностью компенсировать действие возмущений?
2. Что понимается под состоянием равновесия элементов АСР? всей АСР?
3. Может ли АСР находиться в установившемся состоянии при неустановившемся состоянии составляющих ее элементов?
4. Что называется статической ошибкой регулирования? Сравните АСР уровня в емкости и АСР давления в ресивере по величине статической ошибки.
5. Какова взаимосвязь между выходными и входными сигналами у статического и астатического регуляторов? Объясните это на примерах регуляторов уровня в емкости и давления воздуха в ресивере.
6. По какому признаку можно отличить статическую АСР от астатической?

### § 6. УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Как было показано в § 5, астатические АСР могут полностью устранять рассогласование между заданным и фактическим значениями регулируемого параметра. Получается, что такие системы работают идеально и поэтому нет смысла применять другие виды АСР — статические, с компенсацией возмущений и комбинированные. Однако в действительности это не так и в реальных условиях, при непрерывном воздействии возмущений никакая автоматическая система не обеспечивает постоянного совпадения измеренного и заданного значений регулируемого параметра. Это тесно связано с понятием устойчивости замкнутых систем.

Рассмотрим более подробно процесс устранения рассогласования во времени. Обратимся к примеру конкретной АСР температуры в реакторе, который обогревается проходящим через



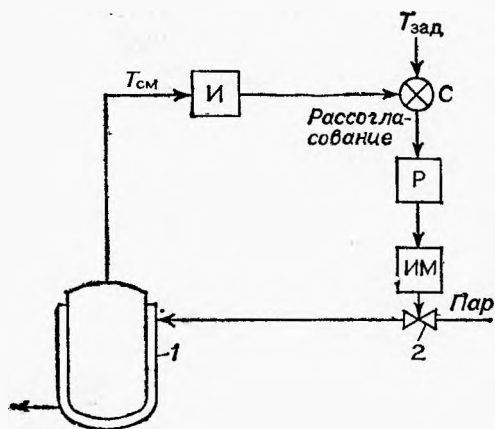


Рис. 7. АСР температуры смеси в реакторе:

И — измерительное устройство; С — сумматор; Р — регулятор; ИМ — исполнительный механизм; 1 — реактор; 2 — клапан.

рубашку паром (рис. 7). Регулируемым параметром здесь является температура смеси  $T_{см}$  в реакторе, а регулирующим — расход пара. Для определенности будем считать, что регулятор  $P$  — астатический, т. е. такой, что регулирующий орган (клапан на линии пара) будет непрерывно открываться или закрываться все время, пока на входе регулятора имеется ненулевое рассогласование. Пусть в некоторый момент времени система регулирования находится в состоянии равновесия: температура смеси в реакторе равна заданной ( $T_{зад}$ ) и расход пара не изменяется. Ясно, что в таком состоянии системы количество тепла, поступающего с паром, в точности равно отдаче тепла в окружающий воздух. Поэтому температура в реакторе не отклоняется от заданного значения.

Допустим теперь, что давление в паропроводе перед клапаном возросло и поэтому расход пара через клапан увеличился. Поведение системы регулирования при этом удобно проследить по изменению температуры смеси и расхода пара во времени (рис. 8, а). После увеличения притока пара в рубашку (точка а),

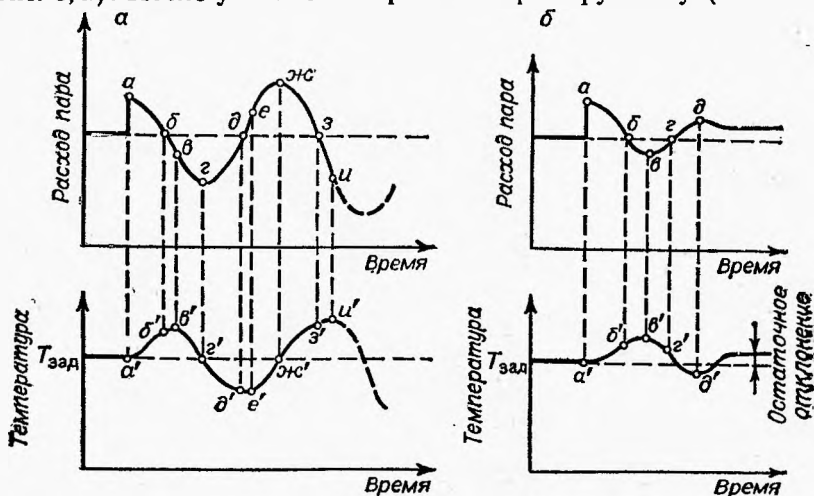


Рис. 8. Графики изменения расхода пара и температуры смеси в реакторе:

а — для астатической АСР; б — для статической АСР;  $T_{зад}$  — заданная температура смеси в реакторе.

температура смеси в реакторе начнет расти сначала медленно, затем быстрее (участок  $a' - b'$ ). Регулятор отреагирует на возникшее рассогласование температуры уменьшением степени открытия клапана, вследствие чего расход пара уменьшится.

Так как регулятор в рассматриваемой АСР астатический, то все время, пока температура выше заданной (положительное рассогласование), клапан будет продолжать закрываться. Следовательно, обязательно наступит момент, когда расход пара уменьшится до первоначального значения (точка  $b$ ). Как видно из рисунка, все это время (участок  $a - b$ ) расход пара был больше исходной величины, при которой температура в реакторе совпадала с заданной. Это значит, что поступление тепла в реактор было больше, чем его отдача в окружающий воздух, т. е. в реакторе (в находящейся в нем реакционной смеси, стенках, теплоизоляции) запасался излишек тепла. Поэтому и после точки  $b'$  температура в реакторе будет продолжать увеличиваться до тех пор, пока снова не наступит тепловое равновесие: поступление тепла с паром сравняется с его отдачей в воздух (точка  $b'$ ). Все это время регулятор закрывает клапан и расход пара продолжает уменьшаться (участок  $b - b'$ ).

Далее температура начинает уменьшаться, так как приток тепла становится меньше его отдачи. Однако все время, пока она остается больше заданной (до точки  $g'$ ), расход пара будет еще больше уменьшаться. Это объясняется свойством астатического регулятора — клапан непрерывно закрывается все время, пока рассогласование больше нуля. На рисунке это участки  $a - g$  и  $a' - g'$ . Таким образом, в точке  $g'$  температура в реакторе в результате действия АСР вернулась к заданной, но расход пара при этом оказался меньше исходного (точка  $g$ ). Следовательно, приток тепла в реактор в этот момент меньше первоначального, при котором соблюдался тепловой баланс в реакторе. Поэтому температура не остановится на заданном значении, а будет продолжать уменьшаться. Здесь мы сталкиваемся с проявлением тепловой инерции объекта регулирования. Именно вследствие этого регулируемый параметр — расход пара в рубашку — и регулируемый параметр — температура в реакторе — как бы проскакивают те значения, при которых АСР находилась в состоянии равновесия (участки на рисунках до возникновения возмущения).

Итак, после точки  $g'$  температура становится ниже заданной (отрицательное рассогласование на входе регулятора) и регулятор начнет увеличивать расход пара в рубашку реактора. В некоторой точке  $d$  расход пара опять сравняется с первоначальным. Температура же по инерции будет продолжать уменьшаться (участок  $d' - e'$ ) аналогично ее изменению на участке  $b' - b'$ .

После точки  $e'$  температура начнет расти и приближаться к заданной. Однако астатический регулятор будет продолжать увеличивать расход пара, и к моменту, когда температура опять

сравнивается с заданной (точка  $ж'$ ), расход пара достигнет максимальной величины (точка  $ж$ ). После этого температура, проскочив заданное значение, будет продолжать расти, а расход пара уменьшаться.

В точках  $з$  и  $з'$  характер изменения расхода пара и температуры в реакторе подобен их изменению в точках  $б$  и  $б'$ . Поэтому далее процессы изменения регулирующего и регулируемого параметров в данной АСР будут развиваться аналогично. Таким образом, в замкнутой системе регулирования с инерционным объектом возникают колебания регулируемого и регулирующего параметров возле их установившихся значений, отвечающих состоянию равновесия АСР. Мы наблюдаем в жизни много примеров таких колебательных процессов: раскачивание автомобиля на рессорах при езде по неровной дороге, колебания качелей после толчка и др.

В зависимости от свойств объекта регулирования и самого регулятора колебания в АСР, вызванные возмущающими воздействиями, могут со временем затухать или нарастать. В первом случае замкнутая система будет возвращать регулируемый параметр к установившемуся значению; такую АСР называют *устойчивой*. Во втором случае установившееся значение параметра никогда не будет достигнуто — его отклонение от задания будет увеличиваться от колебания к колебанию. Такую систему называют *неустойчивой*.

Возможен и промежуточный случай, когда колебания не затухают и не нарастают, т. е. амплитуда колебаний не изменяется во времени. О такой системе говорят, что она находится на *границе устойчивости*.

Возможно и такое сочетание свойств объекта и регулятора, при котором регулируемый параметр приходит к установившемуся значению без колебаний. Ясно, что такая АСР устойчива. Устойчивость — необходимое условие нормальной работы АСР.

В рассмотренном примере регулирования температуры смеси в реакторе АСР будет неустойчивой, если амплитуда каждого последующего колебания температуры будет больше амплитуды предыдущего. На рис. 8, *а* изображен именно этот случай (см. точки  $в'$ ,  $е'$  и  $и'$ ). Если бы амплитуда колебаний уменьшалась, то это означало бы, что система устойчива.

Применение в АСР температуры астатического регулятора увеличивает опасность возникновения неустойчивости, в чем можно убедиться, проанализировав график колебаний температуры. Действительно, на участке  $в'—з'$ , где температура уже возвращается к заданному значению, т. е. рассогласование уменьшается, расход пара следовало бы увеличивать, приближая его к первоначальному значению. Астатизм же регулятора приводит к тому, что на участке  $в—г$  расход пара продолжает уменьшаться. То же самое происходит на участке  $е'—ж'$ , где температура также возвращается к заданному значению, но с другой стороны.

Получается, что всякий раз, когда температура возвращается к заданному значению, астатический регулятор работает «неправильно». Это равносильно попытке остановить раскачавшиеся качели, подталкивая их на подъеме вместо того, чтобы притормаживать.

Разберемся теперь, как изменится характер регулирования температуры в реакторе при использовании в АСР статического регулятора. Напомним, что в соответствии с определением статического регулятора (§ 5) его выходной сигнал зависит от величины входного сигнала — рассогласования. Для нашего примера это означает, что степень открытия клапана определяется величиной рассогласования и при нулевом рассогласовании его положение будет вполне определенным. Будем считать, что этому положению клапана соответствует такой расход пара, при котором система регулирования находится в состоянии равновесия: приток тепла в реактор равен отдаче его в воздух и установившееся значение температуры совпадает с заданным.

После возмущения — скачка давления перед клапаном — расход пара при том же положении клапана увеличится скачком (точка  $a$  на рис. 8,  $b$ ) и температура в реакторе начнет расти. Регулятор при этом, так же как и в предыдущем примере, будет уменьшать расход пара. После момента, когда расход пара уменьшится до первоначального значения (точка  $b$ ), температура по инерции будет продолжать расти. Когда ее рост прекратится (точка  $b'$ ), расход пара уже упадет ниже первоначальной величины (точка  $b$ ).

До этого момента характер изменения температуры и расхода пара был схожим для астатической и статической АСР. Далее уже наблюдается принципиальное различие в изменении этих параметров.

Как только температура начнет уменьшаться, статический регулятор начнет увеличивать расход пара и через некоторое время доведет его до первоначального значения (точка  $z$ ). Мы видим, что на этом участке ( $b - z$ ) статический регулятор, в отличие от астатического, действует «правильно» — при возвращении температуры к заданному значению (участок  $b' - z'$ ) он возвращает и расход пара к первоначальной величине. Поэтому амплитуда последующего уменьшения температуры, вызванного тепловой инерцией реактора (точка  $d'$ ), окажется меньше, чем в астатической АСР. По этой же причине амплитуда каждого следующего колебания будет меньше амплитуды предыдущего и колебания температуры будут постепенно затухать. После прекращения колебаний система регулирования придет в состояние равновесия. Статический регулятор может обеспечить настолько сильное затухание колебаний, что они вообще не будут возникать, т. е. регулируемый параметр плавно придет к установившемуся значению.

Однако новое установившееся значение температуры в рассматриваемой статической АСР уже не совпадет с заданным,

а будет больше его, т. е. появится статическая ошибка регулирования. В этом можно убедиться из следующих рассуждений. Температура в реакторе снова установится на заданном значении только в том случае, если расход пара также вернется к первоначальной величине. Так как давление перед клапаном стало больше, то расход пара равный первоначальному будет обеспечиваться уже при другом положении клапана — более закрытом. Но по свойству статического регулятора такое положение клапана установится при иной, более высокой температуре. Таким образом, в рассматриваемой статической АСР не может установиться прежняя температура — она обязательно будет отличаться от заданной (в нашем случае станет больше). Можно сказать, что статическая ошибка в статической АСР является платой за достижение ее устойчивости.

Из сказанного можно сделать вывод, что астатический регулятор выгоднее, если АСР с ним оказывается устойчивой. В противном случае приходится применять статический регулятор.

Мы рассмотрели процессы в замкнутых АСР, возникающие под действием одного скачкообразного возмущения: уменьшения потребления из емкости в АСР уровня, уменьшения потребления воздуха из ресивера в АСР давления, увеличения давления пара в АСР температуры в реакторе. В действительности же промышленные объекты регулирования обычно подвергаются непрерывному воздействию случайных возмущений. Ясно, что при этом система регулирования никогда не будет доходить до установившегося состояния. Так, даже в устойчивой АСР температуры в реакторе колебания температуры будут незатухающими. Тем не менее, оказывается, что АСР, которая лучше реагирует на разовое возмущение, лучше и в реальной ситуации воздействия непрерывных случайных возмущений.

Ясно, что неустойчивость может возникать только в замкнутом контуре регулирования (см. рис. 5, б). В такой системе сигналы, передаваемые от одного элемента к другому, как бы циркулируют по замкнутому контуру и при этом могут многократно усиливаться. В этом можно убедиться, если разорвать контур регулирования, например, перед входом регулятора, т. е. по линии сигнала рассогласования (рис. 9).

Предположим, что на входе регулятора возникло рассогласование — сигнал  $\Delta x'$ . Под действием рассогласования регуля-

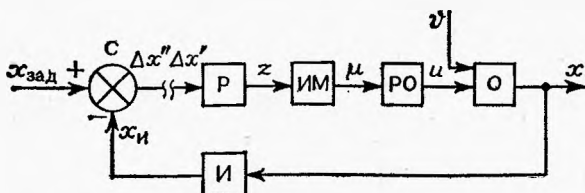


Рис. 9. Структурная схема АСР с разрывом контура регулирования.

$\Delta x'$  — рассогласование после разрыва,  $\Delta x''$  — рассогласование перед разрывом. Остальные обозначения см. рис. 5.

тор выработает команду исполнительному механизму — сигнал  $z$ , а тот, в свою очередь, переместит регулирующий орган (сигнал  $\mu$ ). Вследствие этого изменится регулирующий параметр  $u$  на входе объекта и соответственно изменится выходной сигнал объекта — регулируемый параметр  $x$ . Так, в примере с регулированием температуры в реакторе изменение расхода пара в рубашку (регулирующий параметр) изменит температуру в реакторе (регулируемый параметр).

Выходной сигнал объекта, пройдя по цепи обратной связи через измерительное устройство и сумматор, приведет к появлению нового сигнала рассогласования  $\Delta x''$  на входе регулятора. Таким образом, рассогласование  $\Delta x'$  на входе регулятора (после места разрыва контура регулирования), пройдя по контуру регулирования, превратилось в рассогласование  $\Delta x''$  (перед местом разрыва). Во сколько раз  $\Delta x''$  будет больше  $\Delta x'$  по абсолютной величине, во столько раз контур регулирования усиливает сигнал рассогласования.

Коэффициент усиления сигналов в контуре регулирования характеризует *глубину обратной связи* и является важным показателем замкнутой АСР. Казалось бы, чем больше глубина обратной связи в системе, тем выше точность регулирования. Действительно, чем больше глубина обратной связи, тем сильнее регулятор воздействует на объект и, значит, тем полнее регулирующее воздействие компенсирует действие возмущений. Однако при таком рассуждении не учитывается, что объект регулирования обычно обладает инерцией и его выходной сигнал не сразу реагирует на регулирующее воздействие, т. е. сигналы в контуре регулирования изменяются постепенно, как это видно из рис. 8. В результате этого, как мы убедились, в системе возникают колебания и рассогласование устраняется не сразу или оно даже нарастает, если система неустойчива.

При увеличении глубины обратной связи амплитуда колебаний в замкнутой АСР, как правило, увеличивается. Этим объясняется возможность появления неустойчивости в астатической АСР. Коэффициент усиления астатического регулятора неограниченно увеличивается во времени, так как его выходной сигнал все время изменяется в одну сторону при наличии рассогласования на входе регулятора.

Следовательно, коэффициент усиления контура регулирования и глубина обратной связи в астатической системе неограниченно возрастают до бесконечно больших значений. С одной стороны, это создает опасность возникновения неустойчивости, но, с другой, если астатическая АСР оказывается устойчивой, то в ней нет статической ошибки.

Явление неустойчивости характерно только для замкнутых АСР, в которых реализуется способ управления по отклонению. В отличие от таких АСР, системы регулирования по возмущению являются разомкнутыми и потому всегда устойчивы.

## Контрольные вопросы

1. Может ли АСР обеспечить полное совпадение регулируемой величины с ее заданным значением при наличии возмущающих воздействий?
2. Объясните характер зависимостей изменения расхода пара и температуры в реакторе на участках  $b \rightarrow c$  ( $b' - c'$ ),  $c - d$  ( $c' - d'$ ) и  $d - e$  ( $d' - e'$ ) (рис. 8, а) для астатической АСР. Почему на участке  $d' - e'$  температура уменьшается, несмотря на увеличение притока пара в рубашку реактора? Как это влияет на устойчивость АСР?
3. Объясните характер зависимостей изменения расхода пара и температуры в реакторе на тех же участках для статической АСР (рис. 8, б).
4. Приведите примеры колебательных процессов, подобных процессу в АСР температуры в реакторе.
5. Каков характер изменения во времени регулируемого параметра в устойчивой и неустойчивой АСР? в АСР, находящейся на границе устойчивости?
6. Что такое глубина обратной связи в замкнутой АСР и как она влияет на точность регулирования?
7. Почему статическая АСР устойчивее астатической?
8. Почему в статической АСР возникает статическая ошибка регулирования?
9. К чему приведет увеличение глубины обратной связи в АСР, находящейся на границе устойчивости?
10. Может ли быть неустойчивой система регулирования по возмущению? Комбинированная система регулирования?

## ГЛАВА II

### ОСНОВЫ ТЕХНИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

#### § 7. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ

Управление технологическими процессами, как известно, невозможно без измерения технологических параметров. Измерительное устройство является обязательным элементом любой АСР: в АСР по отклонению измеряется регулируемый параметр, в АСР по возмущению — возмущение, в комбинированной АСР — тот и другой параметр одновременно. Измерения технологических параметров необходимы не только для работы АСР, но и для контроля технологического режима оператором, а также для управления на более высоких иерархических уровнях.

Наука об измерениях называется *метрологией*.

Для измерения различных параметров пользуются *единицами физических величин*, совокупность которых образует *систему единиц*. Среди них различают основные и производные единицы. *Основные* — это единицы, на основе которых построена данная система. Все остальные единицы выражаются через физические закономерности между основными единицами и являются *производными*.

В настоящее время в СССР приняты следующие основные единицы: длины — метр (м), массы — килограмм (кг), време-

ни — секунда (с), тока — ампер (А), температуры — кельвин (К) и °С и силы света — кандела (кд). В химической технологии употребляются следующие производные единицы: силы — ньютон (Н), давления — паскаль (Па), объема — м<sup>3</sup>, объемного расхода — м<sup>3</sup>/с, массового расхода — кг/с, количества тепла — джоуль (Дж).

Измерить физическую величину — значит сравнить ее с соответствующей единицей измерения. Нахождение величины параметра опытным путем с помощью специальных технических средств называется *измерением*.

Измерения, при которых величина измеряемого параметра определяется непосредственно по показаниям прибора, являются *прямыми*. Это, например, измерения напряжения вольтметром, сопротивления омметром, массы тела рычажными весами с гирями, температуры термометром, давления манометром, электрической энергии электросчетчиком и т. п.

Иногда прямые измерения невозможны или затруднительны. В таких случаях значение измеряемого параметра может быть найдено путем прямых измерений других параметров, связанных с измеряемым известной зависимостью. Это измерения *косвенные*.

Например, сопротивление электрического нагревателя в рабочем состоянии (при прохождении через него тока) невозможно измерить омметром. Однако его можно вычислить по закону Ома, измерив для этого падение напряжения на нем вольтметром, а ток через него — амперметром. Это пример косвенного измерения сопротивления путем прямых измерений напряжения и тока.

Измерительное устройство, с помощью которого осуществляется процесс измерения, обычно представляет собой совокупность технических средств, соединенных в измерительную цепь. Так, при измерении напряжения вольтметр представляет собой измерительную цепь. При взвешивании тела на рычажных весах измерительная цепь состоит из весов и набора гирь. В рассмотренных примерах объектами измерения были источник с выходным сигналом — напряжением и взвешиваемое тело с выходным сигналом — массой этого тела. При измерении уровня жидкости в емкости объект измерения — сама емкость с запасом жидкости, а выходной сигнал — уровень этой жидкости.

Любой измеряемый параметр можно рассматривать как выходной сигнал объекта измерения (например, сигналы  $x$ ,  $x_1$  и  $x_2$  на рис. 5). С другой стороны, измеряемый параметр можно рассматривать как входной сигнал измерительной цепи, а результат измерения — как ее выходной сигнал (например, сигналы  $x_n$ ,  $x_{n1}$  и  $x_{n2}$  на рис. 5).

Положение стрелки на шкале вольтметра, масса гирь, уравновешивающих взвешиваемое тело на рычажных весах, график, вычерчиваемый самопишущим измерительным устройством на диаграммной ленте, цифры на счетчике электроэнергии — все



это выходные сигналы измерительных цепей. Эти выходные сигналы доступны для наблюдения.

Положение поплавка в АСР уровня в емкости также является примером выходного сигнала измерительной цепи (измерительного устройства в указанной АСР). Такой выходной сигнал неудобен для наблюдения, но этого в данном случае и не требуется.

Таким образом, измерение есть, по существу, преобразование измеряемого параметра в сигнал, удобный для наблюдения или для дальнейшего преобразования в АСР. Это преобразование измеряемого сигнала осуществляется измерительной цепью, которая представляет собой устройство или совокупность устройств, преобразующих измеряемый сигнал в результат измерения.

### Контрольные вопросы

1. Что такое измерение?
2. Какие из перечисляемых дальше измерений относятся к прямым, а какие к косвенным: измерение скорости по спидометру, измерение скорости через путь и время его прохождения; измерение плотности жидкости ареометром, измерение плотности путем взвешивания известного объема жидкости; измерение количества тепла по изменению температуры тела с известной массой, измерение количества тепла тепломером (калориметром)?
3. Что является измерительным устройством в АСР давления в ресивере (рис. 6)?

### § 8. ЭЛЕМЕНТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ

Преобразование измеряемого сигнала в требуемый выходной сигнал в измерительной цепи может осуществляться одним или несколькими элементами — *измерительными преобразователями*.

Измерительный преобразователь, выходной сигнал которого предназначен для наблюдения, имеет специальное название — *измерительный прибор*. Измерительными приборами являются, например, вольтметр, электросчетчик, рычажные весы, ртутный термометр, автомобильный спидометр, фотоэкспонетр и т. п.

Так как сигнал, предназначенный для наблюдения, является выходным сигналом измерительной цепи, то измерительный прибор всегда бывает последним преобразователем этой цепи.

Простая измерительная цепь (рис. 10) состоит из одного измерительного прибора ИП. Уже приводились примеры

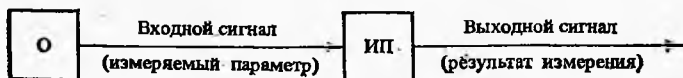


Рис. 10. Простая измерительная цепь:  
О — объект измерения; ИП — измерительный прибор,

такой простой измерительной цепи для измерения напряжения вольтметром и взвешивания тела на рычажных весах.

Если для измерения каждого технологического параметра использовать простую измерительную цепь, состоящую из одного измерительного прибора, то потребуется очень много разновидностей подобных приборов. Чтобы избежать этого, применяют сложную измерительную цепь.

В сложной измерительной цепи, составленной из нескольких последовательно соединенных измерительных преобразователей, первый называется *первичным преобразователем или датчиком*. Входной сигнал первичного преобразователя является входным сигналом всей цепи, т. е. измеряемым сигналом.

Если сложная измерительная цепь включает помимо первичного преобразователя и измерительного прибора другие измерительные преобразователи, то их называют *промежуточными*. Все сигналы сложной измерительной цепи за исключением входного и выходного, также являются промежуточными. Схема сложной измерительной цепи, состоящей из первичного преобразователя *ПП*, промежуточного преобразователя *ПрП* и измерительного прибора *ИП*, представлена на рис. 11.

Первичный преобразователь находится в контакте с измеряемой средой и часто подвергается воздействию высоких температур и давлений, вибрации, влажности и т. п. Поэтому для измерения даже однотипных параметров выпускают различные первичные преобразователи, отличающиеся условиями эксплуатации. Иногда непосредственный контакт первичного преобразователя с измеряемой средой вообще недопустим (например, при измерении высоких температур или уровня в сосудах **высокого давления**). В таких случаях применяют неконтактные первичные преобразователи, не соприкасающиеся с измеряемой средой.

С помощью промежуточного сигнала удается отделить первичный преобразователь от измерительного прибора и разместить измерительный прибор на щите оператора, где обеспечены нормальные условия эксплуатации.

Вид промежуточного сигнала определяется, с одной стороны, принципом действия и конструкцией первичного преобразователя, а с другой — удобством передачи сигнала на расстояние и дальнейшего его преобразования. Часто эти требования оказываются противоречивыми: стремление получить простую и надежную конструкцию первичного преобразователя идет вразрез с требованием удобства дистанционной передачи промежу-

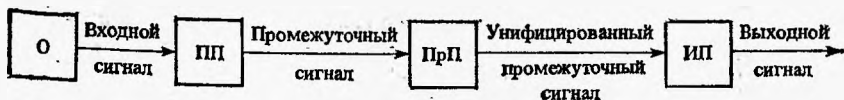


Рис. 11. Сложная измерительная цепь:

O — объект измерения; ПП — первичный преобразователь (датчик); ПрП — промежуточный преобразователь; ИП — измерительный прибор.

точного сигнала по каналу связи к измерительному прибору. Так, многие промышленные первичные преобразователи имеют неудобный для дистанционной передачи выходной сигнал в виде силы или перемещения.

Такие выходные сигналы могут быть измерены лишь при непосредственной механической связи измерительного прибора с первичным преобразователем. Для этого измерительный прибор должен быть расположен рядом с первичным преобразователем или даже объединен с ним в один блок. Если же измерительный прибор установлен на щите оператора и удален от такого первичного преобразователя, то применяют промежуточное преобразование выходного сигнала первичного преобразователя в сигнал, удобный для дистанционной передачи. Иногда в измерительной цепи может быть несколько промежуточных преобразователей, которые предназначены для усиления, размножения сигнала и т. п.

В сложной измерительной цепи (см. рис. 11) входным сигналом измерительного прибора является уже не измеряемый, а промежуточный сигнал. В промышленности используют ограниченное число промежуточных сигналов, что позволяет существенно уменьшить номенклатуру измерительных приборов — наиболее сложных и дорогих элементов измерительной цепи. Благодаря этому один и тот же измерительный прибор может применяться для измерения различных технологических параметров. В этом основное преимущество сложной измерительной цепи перед простой.

Выходные сигналы промежуточных преобразователей, как правило, бывают электрические или пневматические. Такие сигналы наиболее удобны для дистанционной передачи. Вид и пределы изменения промежуточных сигналов унифицированы Государственной системой приборов (ГСП).

В табл. 1 приведены наиболее часто употребляемые в системе ГСП унифицированные сигналы и пределы их изменения.

Унификация промежуточных сигналов позволила вместо специализированных измерительных приборов для измерения

Таблица 1. Характеристики унифицированных сигналов

Ветвь ГСП	Унифицированный сигнал	Пределы изменения
Электрическая: аналоговая	Постоянный ток	0—5; 4—20 мА
	Напряжение постоянного тока	0—10; 0—100 мВ
	Напряжение переменного тока	—1—0—1; 0—2 В
	Частота	4—8 кГц
дискретная	Код	По ГОСТ 13052—74
Пневматическая	Давление сжатого воздуха	$0,2 \cdot 10^5$ — $1,0 \cdot 10^5$ Па

Таблица 2. Сигналы сложных измерительных цепей

Измеряемые параметры	Промежуточные сигналы	Унифицированные сигналы	Выходные сигналы
Давление	Сила	Постоянный ток	Положение отсчетного устройства
Уровень	Перемещение	Напряжение постоянного или переменного тока	Запись на диаграмме
Расход	(линейное или угловое)	Давление сжатого воздуха	Число на цифровом индикаторе
Температура	Электрическое сопротивление		
Плотность	Э.д.с.		
Вязкость			
Влажность			
Концентрация			
***			

конкретных технологических параметров использовать небольшую группу приборов для измерения промежуточных параметров: тока, напряжения, частоты и давления сжатого воздуха. В производственных условиях это дает возможность сократить потребность в запасных приборах и частях к ним, облегчает их ремонт.

При выборе унифицированного промежуточного сигнала руководствуются главным образом длиной канала связи. При длине канала связи до 300 м в качестве промежуточного сигнала можно применять любой унифицированный сигнал, при длине до 10 км — постоянный ток или частотный сигнал, при большей длине — кодированный дискретный сигнал.

Иногда при выборе вида сигнала для дистанционной передачи приходится учитывать такие факторы, как пожаро- и взрывоопасность производства, помехоустойчивость канала связи и др. В этих случаях следует иметь в виду, что пневматический сигнал является пожаро- и взрывобезопасным, а код — наиболее помехоустойчивым.

Если первичный преобразователь имеет электрический выходной сигнал, то для упрощения измерительной цепи его обычно не преобразуют в унифицированный. Для измерения таких неунифицированных электрических сигналов применяют специальные измерительные приборы. Наиболее часто используют такие неунифицированные сигналы, как электрическое сопротивление терморезистора и э. д. с. термопары, которые служат для измерения температуры.

Наиболее распространенные промежуточные, унифицированные и выходные сигналы измерительных цепей приведены в табл. 2.

Выходные сигналы, приведенные в табл. 2, применяют, когда результат измерения должен быть доступным для оператора. Если же измерительная цепь является элементом АСР и ее выходной сигнал поступает в регулятор, то измерительный прибор может отсутствовать.

Итак, в сложной измерительной цепи обычно применяют три способа связи первичного преобразователя с последним

измерительным преобразователем (измерительным прибором, регулятором АСР, УВМ и т. п.):

1) прямая механическая связь посредством неэлектрического сигнала — силы или перемещения;

2) дистанционная связь посредством электрического неунифицированного сигнала (сопротивление терморезистора, э. д. с. термопары и т. п.);

3) дистанционная связь через промежуточный преобразователь посредством унифицированного сигнала ГСП.

### Контрольные вопросы

1. В каких случаях применяется простая измерительная цепь? сложная измерительная цепь?
2. Каково назначение промежуточных преобразователей?
3. Чем отличается измерительный прибор от остальных измерительных преобразователей?
4. Для чего проведена унификация промежуточных сигналов?
5. Для чего предусмотрены различные виды унифицированных сигналов?

### § 9. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ко всей измерительной цепи и к каждому преобразователю в отдельности предъявляются определенные требования: точность измерения или преобразования, заданная зависимость выходного сигнала от входного, чувствительность преобразователей, мощность выходного сигнала и др. Для соответствия этим требованиям каждый измерительный преобразователь и вся измерительная цепь должны обладать заданными метрологическими характеристиками.

**Погрешности измерительных преобразователей.** Любой технологический параметр невозможно измерить абсолютно точно. Это объясняется несовершенством измерительных преобразователей, воздействием на процесс измерения различных внешних возмущений и другими факторами. Поэтому всякое измерение производится с *погрешностью*, под которой понимают отклонение результата измерения от истинного значения измеряемого параметра.

Погрешность измерения — основная метрологическая характеристика измерительных преобразователей и измерительной цепи.

Различают случайные, грубые и систематические погрешности.

*Случайные погрешности* изменяются случайным образом при многократных измерениях одного и того же параметра. Они принципиально не могут быть устранены или учтены при измерениях.

*Грубые погрешности* возникают вследствие неправильной организации процесса измерения (например, из-за неправиль-

ной эксплуатации измерительных преобразователей, неправильного отсчета показаний, выхода из строя какого-либо элемента измерительной цепи и т. п.). Такие погрешности могут быть обнаружены и устранены.

Кроме того, бывают погрешности, которые закономерно изменяются или остаются постоянными при многократных измерениях одного и того же параметра. Это *систематические погрешности*. Они вызваны недостатками методов измерений и конструкций измерительных преобразователей. Систематические погрешности могут быть вычислены и, следовательно, учтены в результатах измерений.

Погрешность измерения определяют по абсолютному значению (модулю) разности между измеренным и истинным значениями параметра. Это *абсолютная погрешность измерения*. Если через  $x_n$  обозначить результат измерения, а через  $x$  — истинное значение параметра, то абсолютная погрешность  $\Delta x$  равна:

$$\Delta x = |x_n - x|. \quad (1)$$

Например, если показания весов 11 г и известно, что истинная масса тела 10 г, то абсолютная погрешность измерения 1 г.

Поскольку истинное значение измеряемого параметра не может быть определено, так как его нельзя измерить абсолютно точно, то, следовательно, и точное определение погрешности измерения по формуле (1) принципиально невозможно. Поэтому для оценки погрешности измерения вместо неизвестного истинного значения измеряемого параметра  $x$  обычно используют результат измерения его более точным прибором или его значение, найденное теоретически.

Часто абсолютная погрешность оказывается неудобной для сравнения точности различных измерений. Так, ошибка в 1 г при взвешивании массы в 10 г значительно более существенна, чем при взвешивании массы в 1 кг, хотя абсолютная погрешность в обоих случаях одинакова. Поэтому вводится понятие *относительной погрешности измерения* — это отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемого параметра, т. е.:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} = \frac{|x_n - x|}{x}. \quad (2)$$

Относительная погрешность, в отличие от абсолютной, — безразмерная величина и, как правило, выражается в процентах. Так, в нашем примере

$$\delta = \frac{1}{10} \cdot 100 = 10 \%.$$

Точность измерительных преобразователей оценивают по *приведенной погрешности*  $\gamma$ , которая определяется как отношение абсолютной погрешности  $\Delta x$  к некоторой постоянной

нормирующей величине  $x_N$ :

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_N}. \quad (3)$$

В качестве нормирующей величины чаще всего принимают диапазон возможного изменения входного сигнала преобразователя, так называемый *диапазон измерения*.

Приведенная погрешность, как и относительная, является безразмерной величиной и обычно выражается в процентах. Кроме того, она пропорциональна абсолютной погрешности. Поэтому если абсолютная погрешность измерительного преобразователя постоянна во всем диапазоне измерения, то приведенная будет также постоянной. Следовательно, она характеризует точность измерительного преобразователя независимо от значения измеряемого параметра и ее считают основной метрологической характеристикой измерительного преобразователя.

Любой измерительный преобразователь подвержен возмущающим воздействиям, искажающим его выходной сигнал. Такими возмущающими воздействиями могут быть, например, изменение температуры, давления и влажности окружающего воздуха, напряжения источника питания, вибрация и т. п. Приведенная погрешность преобразователя изменяется под действием этих возмущений. В связи с этим для каждого измерительного преобразователя регламентируют нормальные условия эксплуатации (температуру и влажность в помещении, напряжение питания и т. п.).

Погрешность измерительного преобразователя при его эксплуатации в нормальных условиях является *основной*. Изменение основной погрешности, возникающее при отклонении условий эксплуатации от нормальных, — *дополнительная погрешность* преобразователя.

Наличие различных показателей точности — абсолютной и приведенной, основной и дополнительной погрешностей — затрудняет сравнение измерительных преобразователей. Поэтому необходима обобщенная характеристика их метрологических свойств. Такой характеристикой является *класс точности* измерительного преобразователя, под которым понимают его максимально допустимую приведенную погрешность (в процентах) при нормальных условиях эксплуатации.

Погрешность преобразователя в каждом отдельном измерении может быть и меньше максимальной. Поэтому класс точности не может служить непосредственным показателем точности преобразователя, он лишь определяет предельное возможное значение приведенной погрешности. ГОСТом установлены стандартные классы точности измерительных преобразователей, например: 0,005; 0,02; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

При выборе измерительного преобразователя для измерения конкретного технологического параметра необходимо обращать внимание не только на его класс точности, но и на диа-

пазон измерения. Например, необходимо измерить напряжение сети переменного тока 220 В. Имеются два вольтметра с одинаковыми классами точности 1,5, но с диапазонами измерения 0—300 В и 0—1000 В. Наибольшая абсолютная погрешность  $\Delta x$  у таких вольтметров может быть найдена из формулы (3), нормирующие значения  $x_N$  соответственно равны 300 и 1000 В:

$$\pm \frac{1,5}{100} 300 = \pm 4,5 \text{ В}; \quad \pm \frac{1,5}{100} 1000 = \pm 15 \text{ В}.$$

Из приведенного примера видно, что при одном и том же классе точности прибор с меньшим диапазоном измерения дает меньшую абсолютную и, следовательно, относительную погрешность измерения, чем прибор с большим диапазоном.

Измерительный преобразователь, как любой элемент, преобразующий входной сигнал в выходной, может находиться в установившемся или неустойчивом состоянии. Все рассмотренные погрешности характеризуют измерительные преобразователи в состоянии равновесия. Если же измеряемый параметр изменяется во времени, то преобразователь находится в неустойчивом состоянии. При этом начинают проявляться его динамические свойства, в связи с чем, выходной сигнал — результат измерения — изменяется не синхронно с входным — измеряемым параметром. В результате возникает дополнительная погрешность измерительного преобразователя, которая проявляется только в его неустойчивом состоянии.

Так, при мгновенном (скачкообразном) увеличении температуры, измеряемой ртутным термометром, ртуть в его баллоне будет нагреваться до новой температуры постепенно, в течение некоторого времени. Показания термометра в течение этого времени будут ниже измеряемой температуры (рис. 12). Здесь мы сталкиваемся с проявлением инерционности ртутного термометра как преобразователя. Вследствие отставания результата измерения от измеряемой температуры и появляется добавочная погрешность ртутного термометра.

Эта добавочная погрешность измерительного преобразователя, возникающая при измерении изменяющегося во времени

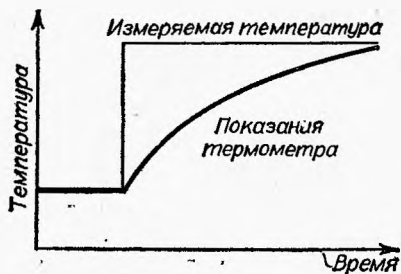


Рис. 12. Погрешность ртутного термометра при скачкообразном изменении температуры.

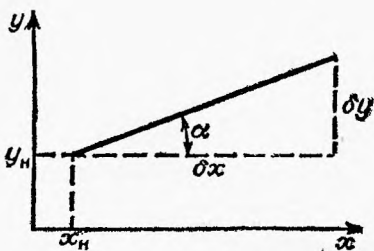


Рис. 13. Линейная статическая характеристика преобразователя,



параметра, называется *динамической*, а погрешность измерительного преобразователя при измерении постоянного параметра — *статической*. Ясно, что динамическая погрешность измерительного преобразователя достигает наибольшей величины при наиболее резком, скачкообразном изменении измеряемого параметра.

**Чувствительность измерительных преобразователей.** Чувствительность измерительного преобразователя характеризует его способность измерять малые сигналы. Чем меньше сигналы может измерять измерительный преобразователь, тем выше его чувствительность; например, милливольтметром можно измерять очень малые напряжения, порядка тысячных долей вольта. Обычный вольтметр не воспринимает такие сигналы и непригоден для их измерения.

На первый взгляд может показаться, что чем выше чувствительность и, следовательно, уже диапазон измерения преобразователя, тем он лучше. Однако с ростом чувствительности увеличивается и погрешность преобразователя. Это объясняется тем, что при уменьшении диапазона измерения не удается во столько же раз снизить абсолютную погрешность преобразователя. Поэтому в формуле (3) для приведенной погрешности величина  $x_n$ , равная диапазону измерения, убывает быстрее, чем абсолютная погрешность  $\Delta x$ . Таким образом, чем выше чувствительность измерительного преобразователя, тем труднее обеспечить требуемую приведенную погрешность  $\gamma$ , т. е. требуемый класс точности. Поэтому для каждой конкретной конструкции измерительного преобразователя существует так называемый *порог чувствительности* — минимально возможный диапазон измерения, при котором абсолютная погрешность становится равной величине этого диапазона и, следовательно, приведенная погрешность достигает 100 %. Ясно, что преобразователь, работающий в диапазоне, близком к порогу чувствительности, не пригоден для измерения. Наличие порога чувствительности ограничивает технические возможности измерения малых сигналов.

**Статическая характеристика измерительных преобразователей.** Для измерительного преобразователя важным метрологическим показателем является зависимость его выходного сигнала от входного в установившемся состоянии — *статическая характеристика*.

Обычно стремятся к линейной зависимости выходного сигнала от входного, т. е. к линейной статической характеристике (рис. 13), которая определяется начальным значением выходного сигнала  $y_n$ , соответствующим начальному значению входного сигнала  $x_n$ , и углом наклона  $\alpha$ . Как видно из рис. 13, тангенс угла наклона характеристики равен отношению диапазона изменения выходного сигнала преобразователя  $\Delta y$  к диапазону изменения его входного сигнала  $\Delta x$ . Это отношение называется

коэффициентом передачи  $k$  измерительного преобразователя:

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta y}{\delta x}. \quad (4)$$

Если входной и выходной сигналы преобразователя выражены в одинаковых единицах измерения, то коэффициент передачи оказывается безразмерным и в этом случае употребляют термин *коэффициент усиления*. Например, коэффициент усиления усилителя напряжения показывает, во сколько раз напряжение на его выходе больше напряжения, поданного на вход.

**Метрологические характеристики измерительной цепи.** В сложной измерительной цепи необходимо определить ее погрешность и коэффициент передачи. Однако, как правило, нельзя установить связь между результирующей погрешностью измерительной цепи и погрешностями составляющих ее преобразователей. Можно лишь оценить границы значений приведенной погрешности сложной цепи.

Если считать, что погрешности всех преобразователей измерительной цепи одного знака, то результирующая погрешность цепи будет равна их сумме. В этом случае погрешность сложной цепи окажется максимальной  $\gamma_{\max}$ :

$$\gamma_{\max} = \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n, \quad (5)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$  — погрешности измерительных преобразователей цепи.

Более реальная оценка получается, если считать погрешности всех преобразователей случайными и вызванными независимыми между собой факторами. В этом случае приведенная погрешность цепи будет меньше  $\gamma_{\max}$ . Такая приведенная погрешность называется *квадратичной*  $\gamma_k$  и находится по формуле:

$$\gamma_k = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \dots + \gamma_n^2}. \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) используют для приближенной оценки величины приведенной погрешности сложной измерительной цепи. Как видно из этих формул, чтобы снизить погрешность всей измерительной цепи, следует уменьшить погрешности составляющих ее преобразователей.

Для определения коэффициента передачи сложной измерительной цепи ее удобно представить как один эквивалентный измерительный преобразователь (рис. 14). Входным сигналом такого эквивалентного преобразователя будет входной сигнал первого преобразователя  $x_1$ , а выходным — выходной сигнал последнего преобразователя  $x_{n+1}$ . Коэффициент передачи эквивалентного преобразователя  $\Pi$  по формуле (4) равен:

$$k = \frac{\delta x_{n+1}}{\delta x_1}. \quad (7)$$

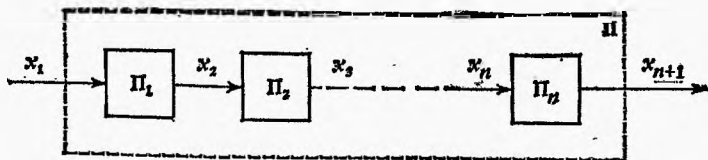


Рис. 14. Эквивалентный преобразователь:

$\Pi$  — эквивалентный преобразователь;  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$  — измерительные преобразователи,  $x_1, x_2, \dots, x_{n+1}$  — сигналы преобразователей.

С другой стороны, можно записать:

$$\frac{\delta x_{n+1}}{\delta x_1} = \frac{\delta x_2}{\delta x_1} \cdot \frac{\delta x_3}{\delta x_2} \cdot \dots \cdot \frac{\delta x_{n+1}}{\delta x_n}. \quad (8)$$

В справедливости этого равенства легко убедиться, если в его правой части числитель первой дроби сократить со знаменателем второй дроби, числитель второй дроби — со знаменателем третьей и т. д.

В соответствии с определением коэффициента передачи каждая дробь в правой части этого тождества представляет собой коэффициент передачи соответствующего преобразователя  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ . Отсюда следует, что коэффициент передачи цепи последовательно включенных преобразователей равен произведению их коэффициентов передачи:

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n. \quad (9)$$

Из этой зависимости вытекает следующее правило: если статические характеристики всех преобразователей измерительной цепи линейны, то такой же будет и статическая характеристика измерительной цепи. Это правило широко применяется при создании промежуточных преобразователей и измерительных приборов.

В процессе эксплуатации измерительных преобразователей их метрологические характеристики могут изменяться. Поэтому с периодичностью, установленной ГОСТом, все технические средства измерений должны подвергаться *поверке*, при которой их показания сравниваются с показаниями более точного — образцового преобразователя. Класс точности образцового преобразователя должен быть не менее чем в три раза выше класса точности поверяемого. Так, для поверки преобразователя с классом точности 1,5 требуется преобразователь с классом точности 0,5.

### Контрольные вопросы

1. Что такое погрешность измерения?
2. Какие погрешности измерений можно обнаружить и устранить? можно обнаружить и учесть в результатах измерений? невозможно ни обнаружить, ни устранить, ни учесть в результатах измерений?
3. Какой из видов погрешности (случайная, грубая или систематическая) стрелочного измерительного прибора, например вольтметра, увеличится, если у него погнута стрелка?

4. Почему приведенная погрешность является более удобной метрологической характеристикой измерительного преобразователя, чем абсолютная или относительная?
5. Что такое класс точности измерительного преобразователя?
6. Почему универсальный измерительный прибор (тестер) имеет не один, а несколько диапазонов измерения напряжения: 1; 2,5; 5; 10; 25; 50; 100; 250; 500 В?
7. Почему при измерении температуры медицинский термометр держат не менее 5 мин? Что он покажет, если измерение производить быстрее, например, за 1 мин?
8. Что понимается под чувствительностью измерительного преобразователя?
9. Какие величины определяют статическую характеристику измерительного преобразователя?
10. Какова будет статическая характеристика измерительной цепи, если один из составляющих ее измерительных преобразователей имеет квадратичную статическую характеристику, а остальные — линейные?
11. Какая оценка результирующей погрешности сложной измерительной цепи больше: суммарная или квадратичная? Какая из них ближе к истинной погрешности цепи?
12. Для чего производят поверку измерительных преобразователей? Какие из них, по Вашему мнению, требуют частых поверок, а какие — редких?

### § 10. НАГРУЗОЧНЫЙ ЭФФЕКТ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЯХ

Как известно, для измерения любого технологического параметра необходимо подключить к объекту измерения измерительную цепь. Процесс измерения при этом можно рассматривать как такое воздействие объекта на измерительную цепь, благодаря которому измеряемый сигнал преобразуется в результат измерений. Вместе с тем происходит и обратное явление: измерительная цепь воздействует на объект измерений. Такое воздействие измерительной цепи на объект проявляется в изменении его измеряемого параметра. Поэтому в действительности мы всегда измеряем искаженное значение параметра.

В измерительной цепи передачу сигнала можно рассматривать также как результат воздействия каждого измерительного преобразователя на последующий, а любой измерительный преобразователь — как объект измерения для оставшейся части измерительной цепи. Отсюда следует, что каждый последующий измерительный преобразователь оказывает обратное влияние на предыдущий, искажая его выходной сигнал.

Такой эффект искажения сигналов в измерительной цепи приводит к дополнительной погрешности измерения и имеет место в большей или меньшей степени при любом измерении. Рассмотрим несколько примеров.

При измерении тока на участке электрической цепи с помощью амперметра этот участок цепи является объектом измерения, а амперметр — измерительной цепью. Здесь влияние измерительной цепи на объект измерения заключается в увеличении сопротивления участка цепи в результате включения в него амперметра, что приводит к уменьшению измеряемого тока.

Точно так же при измерении напряжения на участке электрической цепи с помощью вольтметра этот участок является

*Мерой* называется такой элемент измерительной цепи, который предназначен для частичного или полного уравнивания измеряемого параметра. Мера может иметь как постоянное, так и переменное, но всегда известное значение. В рассмотренном примере мерой массы тела является гиря с известной массой (рис. 15, б) или набор таких гирь, позволяющий получать переменную массу (рис. 15, в).

При наличии гири постоянной массы пружина уравнивает разность весов тела и гири. Поэтому метод измерений с частичным уравниванием измеряемой величины мерой — *разностный*, или *дифференциальный*. При этом разность  $\Delta x$  между значениями меры  $x_m$  и измеряемой величины  $x$  преобразуется в выходной сигнал  $y$  — показания измерительного прибора. В этом случае шкала прибора выполняется уже с учетом значения меры. Структурная схема этого метода измерений показана на рис. 16, б.

При полном уравнивании взвешиваемого тела переменным набором гирь (переменной мерой) разность массы тела и набора гирь доводится до нуля. Метод измерений с полным уравниванием измеряемой величины переменной мерой называется *нулевым* или *компенсационным*. Выходным сигналом — показанием прибора — здесь является значение переменной меры  $x_m$ , а для обнаружения момента уравнивания используется специальное устройство — индикатор нуля ИН. Индикатор нуля представляет собой измерительный преобразователь с очень большим коэффициентом передачи. Структурная схема этого метода измерений показана на рис. 16, в.

Из всех методов сравнения с мерой дифференциальный и нулевой методы измерения являются наиболее распространенными.

При взвешивании тела без гирь (см. рис. 15, а) уравнивание производится только пружиной. Такой метод измерений без использования меры — *метод непосредственной оценки*. При этом измеряемый параметр  $x$  непосредственно преобразуется в выходной сигнал — показания прибора. Структурная схема этого метода измерения показана на рис. 16, а.

Рассмотрим теперь достоинства и недостатки каждого метода измерений.

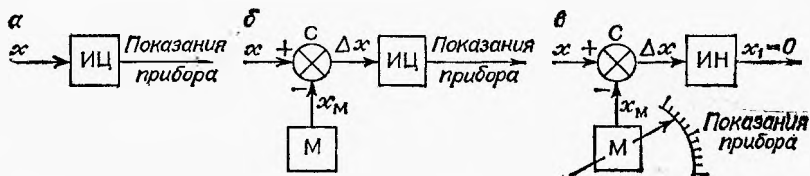


Рис. 16. Структурные схемы методов измерений:

а — непосредственной оценки; б — дифференциальный; в — нулевой; ИЦ — измерительная цепь; ИН — индикатор нуля; М — мера; С — сумматор;  $x$  — измеряемый параметр;  $x_m$  — величина меры;  $\Delta x$  — разность между измеряемым параметром и величиной меры;  $x_1$  — выходной сигнал индикатора нуля.

Пусть взвешиваемые тела имеют массу в диапазоне от 40 до 50 кг. Как указывалось, для уменьшения погрешности измерений целесообразно применять измерительный прибор с наименьшим возможным диапазоном измерений. Поэтому при взвешивании тел методом непосредственной оценки следует взять весы с диапазоном измерений 0—50 кг. Пусть класс точности весов 1,0. Тогда абсолютная погрешность взвешивания в соответствии с формулой (3) равна:

$$\pm \frac{1,0 \cdot 50}{100} = \pm 0,5 \text{ кг.}$$

При дифференциальном методе измерений выберем в качестве меры гирию массой 40 кг. Тогда потребуются весы с диапазоном измерений 0—10 кг. В этом случае при том же классе точности весов абсолютная погрешность взвешивания будет:

$$\pm \frac{1,0 \cdot 10}{100} = \pm 0,1 \text{ кг.}$$

Отсюда видно, что применение дифференциального метода вместо метода непосредственной оценки позволяет уменьшить абсолютную погрешность измерений в 5 раз при одном и том же классе точности измерительного прибора.

При взвешивании тех же тел нулевым методом, как отмечалось, весы играют роль индикатора нуля, а результатом измерений (показаниями прибора) является масса набора гирь, уравновешивающих взвешиваемое тело. Погрешность измерений в этом случае определяется порогом чувствительности весов. В самом деле, в момент уравновешивания масса набора гирь может отличаться от массы тела лишь на значение, равное порогу чувствительности весов. А так как порог чувствительности является лишь частью абсолютной погрешности весов, то при прочих равных условиях погрешность взвешивания нулевым методом будет меньше, чем дифференциальным. Следовательно, в нашем примере погрешность взвешивания нулевым методом меньше 0,1 кг.

Таким образом, погрешность измерений может быть уменьшена при переходе от метода непосредственной оценки к дифференциальному и от дифференциального к нулевому. Однако такое уменьшение погрешности измерений достигается усложнением измерительной цепи: при дифференциальном методе уже требуется наличие меры, а при нулевом методе значение меры необходимо еще и изменять.

Дальнейшего совершенствования методов измерений можно добиться применением обратной связи, которая позволяет автоматизировать процесс уравновешивания при нулевом методе.

В этом случае значение переменной меры должно автоматически изменяться до тех пор, пока выходной сигнал индикатора нуля не дойдет до нуля. Для этого индикатор нуля охватывается отрицательной обратной связью через интегратор и специальный измерительный преобразователь, выполняющий функцию

переменной меры. Структурная схема такой системы автоматического уравнивания измеряемой величины  $x$  мерой  $x_m$  показана на рис. 17, а. В этой системе измерительный преобразователь ОП, выполняющий функцию переменной меры, находится в цепи обратной связи и поэтому называется *обратным преобразователем*.

Убедимся, что полученная система подобна следящей системе регулирования с обратной связью, рассмотренной в гл. I (см. рис. 5, б). Для этого изобразим ее в другом виде, представленном на рис. 17, б. Из сравнения этой системы с АСР по отклонению видно, что меру  $x_m$  можно рассматривать как регулируемый параметр, измеряемую величину  $x$  — как его задание, а  $\Delta x$  — как рассогласование между ними. Тогда обратный преобразователь ОП играет роль объекта, а индикатор нуля ИН вместе с интегратором И — роль астатического регулятора.

Как было показано в § 5, рассогласование  $\Delta x$  зависит от свойств объекта регулирования и регулятора, т. е. в рассматриваемой схеме — от свойств обратного преобразователя, индикатора нуля и интегратора. Так как регулятор в этой системе астатический, то рассогласование  $\Delta x$  будет доводиться до нуля, т. е. значение меры  $x_m$  будет совпадать со значением измеряемой величины  $x$  при любых ее изменениях. Таким образом, величина  $x_m$  точно отслеживает величину  $x$ . С другой стороны, величина  $x_m$  является выходным сигналом обратного преобразователя ОП, а результат измерения  $x_2$  — его входным сигналом. Поэтому результат измерения будет, так же, как и сигнал  $x_m$ , отслеживать измеряемую величину  $x$ .

Для того чтобы зависимость  $x_2$  от  $x$  была достаточно точной, обратный преобразователь ОП должен иметь возможно мень-

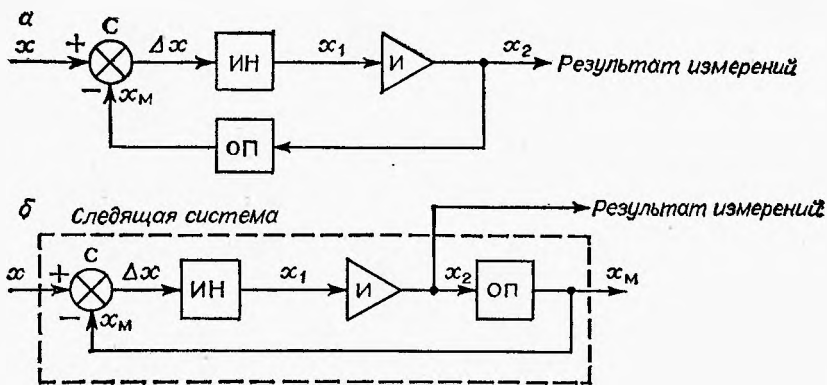


Рис. 17. Структурная схема нулевого метода измерения с автоматическим уравниванием:

а — с обратным преобразователем в цепи обратной связи; б — в виде следящей системы (с обратным преобразователем в прямой цепи); С — сумматор; ИН — индикатор нуля; И — интегратор, ОП — обратный преобразователь;  $x$  — измеряемый параметр;  $x_m$  — значение меры,  $\Delta x$  — разность между значениями измеряемого параметра и меры;  $x_1$  — выходной сигнал индикатора нуля;  $x_2$  — результат измерения,

шую погрешность, поскольку при реализации нулевого метода измерений в виде автоматической следящей системы (рис. 17) погрешность измерений зависит только от его метрологических характеристик.

Заметим, что автоматического уравнивания измеряемого параметра мерой можно также добиться применением статической АСР с достаточно глубокой обратной связью. Схема такой АСР отличается от приведенной на рис. 17 только отсутствием интегратора И. Установившееся отклонение сигнала  $x_m$  от измеряемого сигнала  $x$  в этом случае не равно нулю ( $\Delta x \neq 0$ ), но его можно сделать достаточно малым при увеличении глубины обратной связи. Достоинством нулевого метода измерений на основе статической АСР является отсутствие интегратора, что в некоторых случаях дает возможность значительно упростить конструкцию измерительной цепи.

Автоматизация процесса уравнивания позволяет широко применять нулевой метод измерений в промежуточных преобразователях и измерительных приборах. В большинстве же первичных преобразователей ни дифференциальный, ни нулевой методы, к сожалению, не могут быть использованы. Это объясняется тем, что практически невозможно создать обратный преобразователь с выходным сигналом той же природы, что и измеряемый технологический параметр: расход, температура, концентрация, уровень и т. п. Поэтому в первичных преобразователях применяется, как правило, метод непосредственной оценки.

### Контрольные вопросы

1. Какую роль играет мера в процессе измерений?
2. Сравните достоинства и недостатки метода непосредственной оценки и методов сравнения с мерой.
3. В чем разница между нулевым и дифференциальными методами измерений?
4. Каково назначение индикатора нуля при нулевом методе измерения?
5. Какова величина выходного сигнала индикатора нуля в следящей системе (рис. 17) в момент уравнивания?
6. Как изменится выходной сигнал индикатора нуля, если из следящей системы с автоматическим уравниванием убрать интегратор?
7. Почему точность измерения в следящей системе с автоматическим уравниванием зависит только от метрологической характеристики обратного преобразователя?
8. Можно ли применить нулевой метод измерения в первичных преобразователях?

### ГЛАВА III

#### ЭЛЕМЕНТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В настоящее время в технике широко применяют блочный принцип построения сложных технических устройств. В соответствии с этим принципом функции, выполняемые сложным устрой-



Таблица 3. Механические элементарные преобразователи

Преобразователь	Входной сигнал	Выходной сигнал
Рычаг	Вращающий элемент	Угловое (линейное) перемещение
Шток	Сила	Линейное перемещение
Пружина	Линейное перемещение	Сила
	Сила	Линейное перемещение

ством, разбивают на ряд простых, элементарных. Элементарные функции выполняют и более простые устройства. Любое сложное устройство может быть собрано из таких простых устройств. Любую АСР, например, можно собрать из унифицированных элементов: измерительных устройств, сумматоров, регуляторов и регулирующих органов.

Измерительную цепь, как было показано в § 8, также целесообразно разбить на ряд элементов: первичный преобразователь, промежуточные преобразователи и измерительный прибор. Это позволяет унифицировать промежуточные преобразователи и измерительные приборы и существенно сократить их номенклатуру. Вообще блочный принцип дает возможность унифицировать отдельные элементы сложных устройств и облегчает их соединение.

При разработке промежуточных преобразователей и измерительных приборов также используют блочный принцип, разбивая их на простейшие преобразователи, каждый из которых выполняет, как правило, одну элементарную функцию и называется *элементарным*. Однако элементарные преобразователи обычно не обеспечивают требуемых метрологических характеристик преобразования: малой погрешности, стабильности, линейности, чувствительности, а также достаточной мощности выходного сигнала. Поэтому в промышленных преобразователях и измерительных приборах применяют комбинации элементарных преобразователей с использованием обратной связи, корректирующих и регулирующих элементов, усилителей сигналов и т. п.

## § 12. МЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Наиболее распространенные механические элементарные преобразователи указаны в табл. 3.

**Рычаг.** Служит для преобразования вращающего момента  $M$  в угловое перемещение (рис. 18). При малых углах поворота рычага перемещение всех его точек почти линейное. Поэтому рычаг с малым углом поворота можно считать преобразователем момента в линейное перемещение  $l$ .

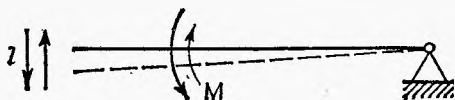


Рис. 18. Рычаг.

Рычаг может находиться в состоянии равновесия только при отсутствии входного сигнала, когда действующий на него вращающий момент  $M$  равен нулю. При наличии входного сигнала ( $M \neq 0$ ) рычаг непрерывно поворачивается и его выходной сигнал (перемещение  $l$ ) непрерывно изменяется. При снятии входного сигнала это изменение прекратится, а положение рычага в этот момент может оказаться любым. Как указывалось в § 5, такой вид зависимости выходного сигнала от входного характерен для интегратора. Следовательно, рычажный преобразователь вращающего момента в перемещение является интегратором.

**Шток.** Служит для преобразования силы  $F$  в линейное перемещение  $l$  (рис. 19). Если на шток действует несколько сил, направленных вдоль его оси, то за  $F$  принимают результирующую этих сил.

При наличии входного сигнала  $F$  шток непрерывно перемещается, т. е. его выходной сигнал  $l$  непрерывно изменяется. При снятии входного сигнала перемещение штока прекратится и его положение в этот момент может оказаться любым. Следовательно, шток, как и рычаг, является интегратором.

**Пружина.** Служит для преобразования линейного перемещения  $l$  в силу  $F$  (рис. 20). Между деформацией пружины  $l$  и усилием  $F$  имеется линейная зависимость:

$$F = kl. \quad (10)$$

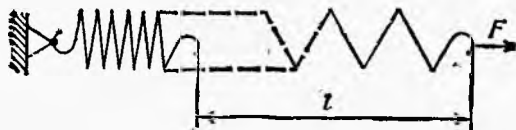
Коэффициент пропорциональности  $k$ , называемый жесткостью пружины, представляет собой коэффициент передачи ее как преобразователя. Жесткость каждой пружины — постоянная величина. Жесткости пружин различного назначения могут сильно отличаться. Существуют пружины, обладающие очень большой жесткостью, например пружины в рессорах железнодорожных вагонов. Имеются и пружины с очень малой жесткостью, например в наручных часах.

С помощью пружины можно производить и обратное преобразование силы в перемещение. При этом ее статическая характеристика также будет линейной.

### Контрольные вопросы

1. При каком условии за выходной сигнал рычага можно принять не угол поворота, а линейное перемещение?
2. Как будет работать рычаг, если на него действует несколько вращающих моментов? Будет ли он в этом случае выполнять функцию интегратора?

Рис. 20. Пружина



3. Какие элементарные преобразователи могут служить сумматорами сил, действующих по одной линии? в одной плоскости?
4. Имеется две пружины с различной жесткостью. Какая из них больше растянется под действием одинаковых сил?

### § 13. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Наиболее распространенные электрические элементарные преобразователи указаны в табл. 4.

**Реостат.** Представляет собой намотанную на каркас проводочную спираль, по которой перемещается передвижной контакт (рис. 21). Реостат предназначен для преобразования перемещения  $l$  в изменение электрического сопротивления  $R$ .

Существуют реостаты с линейной и нелинейной характеристиками. Зависимость выходного сигнала от входного для реостатов с линейной характеристикой имеет вид:

$$R = kl. \quad (11)$$

Коэффициент пропорциональности  $k$  в этой формуле является коэффициентом передачи реостата.

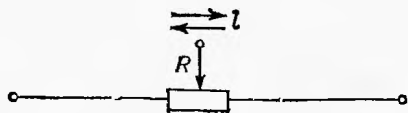
Достоинство реостата как преобразователя — возможность получения любой заданной зависимости выходного сигнала от входного, например линейной или квадратичной.

Следует иметь в виду, что для работы реостата как преобразователя его необходимо включить в электрическую цепь. При этом в зависимости от способа включения выходным сигналом реостата может быть напряжение на нем, ток или сопротивление. В последнем случае его включают в специальную схему, называемую уравновешенным мостом (уравновешенный мост рассматривается в § 16).

**Неуравновешенный мост.** Некоторые технологические параметры, например температура, как указывалось в § 8, первичным преобразователем преобразуются в изменение электрического сопротивления. Такие преобразователи можно рассматри-

Таблица 4. Электрические элементарные преобразователи

Преобразователь	Входной сигнал	Выходной сигнал
Реостат	Линейное перемещение	Электрическое сопротивление
Неуравновешенный мост	Электрическое сопротивление	Напряжение
Магнитоэлектрический преобразователь	Ток	Сила
Трансформаторный преобразователь	Линейное или угловое перемещение	Напряжение переменного тока
Усилитель	Напряжение	Напряжение
Реверсивный электродвигатель	»	Угол поворота (угловое многооборотное перемещение)



вать как резисторы с переменным сопротивлением. Для работы переменного резистора его так же, как и реостат, необходимо включить в электрическую цепь. В качестве такой цепи часто используют неуравновешенный мост, который преобразует переменное сопротивление в напряжение.

Чтобы понять принцип действия неуравновешенного моста, рассмотрим сначала более простой преобразователь сопротивления в напряжение, называемый делителем. Делитель представляет собой последовательное соединение переменного резистора  $R_1$  и постоянного резистора  $R_2$ , включенных по схеме, показанной на рис. 22, а. Входным сигналом делителя является сопротивление резистора  $R_1$ , а выходным — напряжение на нем  $U_1$  (рис. 22, б).

Для работы делителя на него необходимо подать напряжение питания  $U_{\text{пит}}$ . При изменении входного сигнала — сопротивления  $R_1$  — изменяется и общее сопротивление делителя равно  $R_1 + R_2$ . При этом изменяется ток через делитель  $i$  и напряжение на переменном резисторе  $U_1$ , т. е. выходной сигнал. В соответствии с законом Ома для участка цепи ток  $i$  через делитель равен:

$$i = \frac{U_{\text{пит}}}{R_1 + R_2}, \quad (12)$$

а напряжение на резисторе  $R_1$  определяется по формуле

$$U_1 = iR_1 = U_{\text{пит}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (13)$$

Изменение сопротивления  $R_1$  приводит к изменению и числителя и знаменателя дроби в формуле (13). Однако, в отличие от числителя, знаменатель при этом изменяется слабее, так как здесь  $R_1$  является лишь одним из слагаемых. Это приводит к нелинейности статической характеристики делителя  $D$ , которая приведена на рис. 22, в.

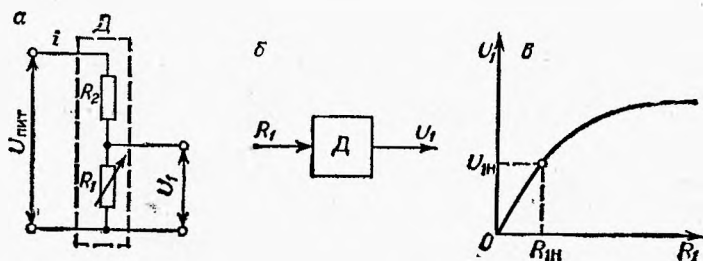


Рис. 22. Делитель:

а — схема; б — структурная схема; в — статическая характеристика; Д — делитель.

Кроме нелинейности характеристики делитель обладает еще одним недостатком: его выходное напряжение равно нулю лишь при нулевом сопротивлении переменного резистора  $R_1$ . Диапазон же изменения сопротивления переменных резисторов, применяемых в качестве датчиков, как правило, начинается не от нуля, а от некоторого начального сопротивления  $R_{1н}$ . Поэтому выходное напряжение делителя начинается с величины  $U_{1н}$  и часть диапазона выходного сигнала от 0 до  $U_{1н}$  оказывается неиспользованной.

Этого недостатка лишен неуравновешенный мост (рис. 23, а) благодаря применению в нем двух делителей: рассмотренного выше делителя  $D_1$  с переменным резистором  $R_1$  и делителя  $D_2$  с постоянными резисторами  $R_3$  и  $R_4$ . Резисторы, составляющие мост, называются его плечами.

Входным сигналом моста является сопротивление переменного резистора  $R_1$ , а выходным — напряжение  $\Delta U$ , равное разности выходных сигналов делителей  $U_1$  и  $U_2$ .

Выходной сигнал постоянного делителя связан с сопротивлениями его резисторов, так же как и в переменном делителе, по формуле

$$U_2 = U_{пит} \frac{R_3}{R_3 + R_4}. \quad (14)$$

Поэтому для неуравновешенного моста зависимость выходного сигнала  $\Delta U$  от входного  $R_1$  имеет вид:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = U_{пит} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - U_{пит} \frac{R_3}{R_3 + R_4}, \quad (15)$$

т. е.

$$\Delta U = U_{пит} \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (16)$$

Эта зависимость приведена на рис. 23, в. Как видно из графика, зависимость выходного сигнала неуравновешенного моста от входного нелинейна. Из графика также видно, что выходное напряжение неуравновешенного моста  $\Delta U$  равно нулю при начальном сопротивлении переменного резистора  $R_{1н}$ . Как следует из формулы (16), подбором сопротивлений постоянных плеч

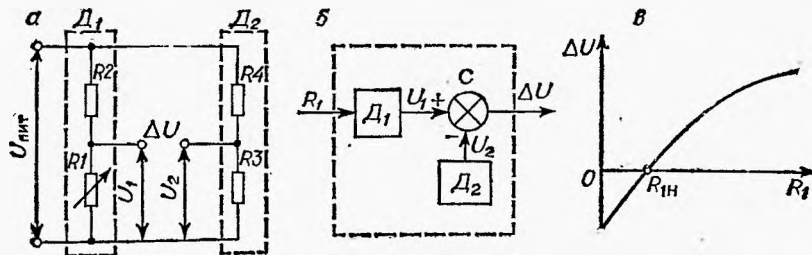
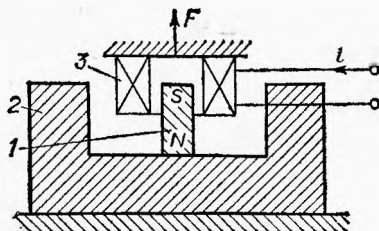


Рис. 23. Неуравновешенный мост:

а — схема; б — структурная схема; в — статическая характеристика;  $D_1$ ,  $D_2$  — делители;  $\Sigma$  — сумматор,

Рис. 24. Магнитоэлектрический преобразователь:

1 — постоянный магнит; 2 — магнитопровод; 3 — катушка.



моста всегда можно добиться того, чтобы нулевой выходной сигнал соответствовал началу диапазона изменения сопротивления переменного резистора (чтобы начало диапазона было в точке  $R_{1н}$ ).

Состояние моста, при котором его выходной сигнал равен нулю, называется состоянием равновесия, а мост в этом состоянии — уравновешенным.

Из формулы (16) видно, что условие равновесия моста выполняется при равенстве произведений противоположных плеч моста, т. е. когда

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \quad (17)$$

Неуравновешенный мост как преобразователь сопротивления  $R_1$  в напряжение  $\Delta U$  можно представить как алгебраический сумматор двух напряжений  $U_1$  и  $U_2$  (рис. 23, б). Напряжение  $U_1$  является выходным сигналом делителя  $D_1$  и изменяется при изменении его входного сигнала — сопротивления  $R_1$  — в соответствии с зависимостью (13). Напряжение  $U_2$  является выходным сигналом делителя  $D_2$ , образованного постоянными резисторами  $R_3$  и  $R_4$ . Следовательно, величина напряжения  $U_2$  постоянна.

Из сравнения рис. 23, б и 16, б можно заключить, что неуравновешенный мост реализует дифференциальный метод измерения, а делитель  $D_2$  представляет собой постоянную меру. Особенность неуравновешенного моста заключается в том, что мера конструктивно является частью моста и образована резисторами его постоянных плеч.

**Магнитоэлектрический преобразователь.** Предназначен для преобразования тока в силу (рис. 24). Он состоит из постоянного магнита 1 и магнитопровода 2, образующих магнитную цепь, в разрыве которой помещена катушка 3.

При взаимодействии электрического тока  $i$ , протекающего по катушке, с полем постоянного магнита возникает сила  $F$ , действующая на катушку. Зависимость этой силы от тока по закону силового действия тока выражается формулой

$$F = ki, \quad (18)$$

где коэффициент пропорциональности  $k$  является коэффициентом передачи магнитоэлектрического преобразователя.

Достоинством магнитоэлектрического преобразователя является линейность его характеристики.

**Трансформаторный преобразователь.** Трансформаторный преобразователь служит для преобразования перемещения в напря-

жение переменного тока. Для преобразования линейных перемещений наибольшее применение получили дифференциально-трансформаторные преобразователи, а для угловых перемещений — ферродинамические.

Чтобы понять принцип действия дифференциально-трансформаторного преобразователя, рассмотрим сначала более простой преобразователь линейного перемещения (рис. 25). Он представляет собой трансформатор, состоящий из двух обмоток: первичной 1 и вторичной 2, расположенных на каркасе 3. Внутри каркаса может перемещаться железный плунжер 4, который изменяет магнитную проницаемость среды. Поэтому выходной сигнал трансформатора — напряжение переменного тока  $U$  — зависит от входного сигнала — положения плунжера  $l$ . Напряжение максимально, когда плунжер находится в середине каркаса, и уменьшается при его выдвигении из каркаса. Зависимость выходного сигнала трансформатора  $U$  от входного  $l$  приведена на рис. 25, в.

Дифференциально-трансформаторный преобразователь (рис. 26) состоит из двух одинаковых трансформаторов с общим каркасом и плунжером. Обе обмотки каждого трансформатора расположены на одной из половин каркаса.

Электрическая схема дифференциально-трансформаторного преобразователя показана на рис. 26, б. Как видно из схемы, первичные обмотки обоих трансформаторов соединены так, что одна является продолжением другой (согласное включение обмоток). Вторичные же обмотки трансформаторов соединены таким образом, что их напряжения вычитаются друг из друга (встречное включение). Поэтому и результирующее напряжение  $U$  дифференциально-трансформаторного преобразователя равно разности напряжений вторичных обмоток составляющих его трансформаторов.

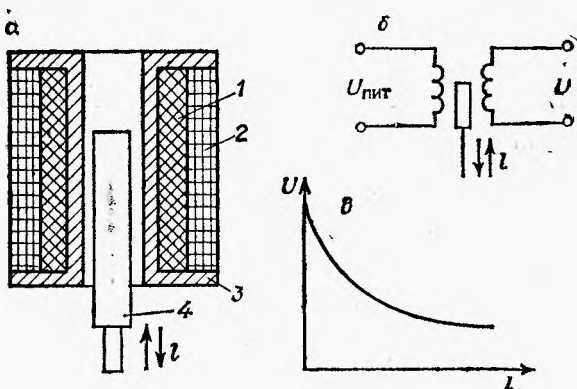


Рис. 25. Трансформаторный преобразователь:

а — устройство; б — электрическая схема; в — статическая характеристика; 1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка; 3 — каркас; 4 — плунжер.

Зависимость напряжения дифференциально-трансформаторного преобразователя  $U$  (выходной сигнал) от перемещения плунжера  $l$  (входной сигнал) приведена на рис. 26, в. Из рисунка видно, что при среднем положении плунжера ( $l=0$ ) выходной сигнал равен нулю.

В промышленных дифференциально-трансформаторных преобразователях ход плунжера выбирается малым по сравнению с длиной катушек трансформатора (обычно не более 5 мм). При этом, как видно из рис. 26, в, зависимость напряжения  $U$  от перемещения плунжера  $l$  можно считать линейной:

$$U = kl, \quad (19)$$

где коэффициент пропорциональности  $k$  является коэффициентом передачи дифференциально-трансформаторного преобразователя.

Линейность статической характеристики выгодно отличает дифференциально-трансформаторный преобразователь от простого трансформаторного.

Рассмотрим теперь ферродинамический преобразователь углового перемещения в напряжение переменного тока (рис. 27). Он представляет собой трансформатор, первичная обмотка которого  $1$  намотана на железный сердечник  $2$ , а вторичная обмотка  $3$  выполнена в виде поворотной рамки и находится в зазоре между концами сердечника. В соответствии с законом электромагнитной индукции напряжение  $U$  зависит от положения вторичной обмотки по отношению к силовым линиям магнитного поля между концами сердечника.

Когда рамка со вторичной обмоткой расположена вдоль силовых линий, напряжение равно нулю. При повороте рамки в ту или иную сторону от этого положения напряжение увеличивается по абсолютной величине, а его фаза зависит от

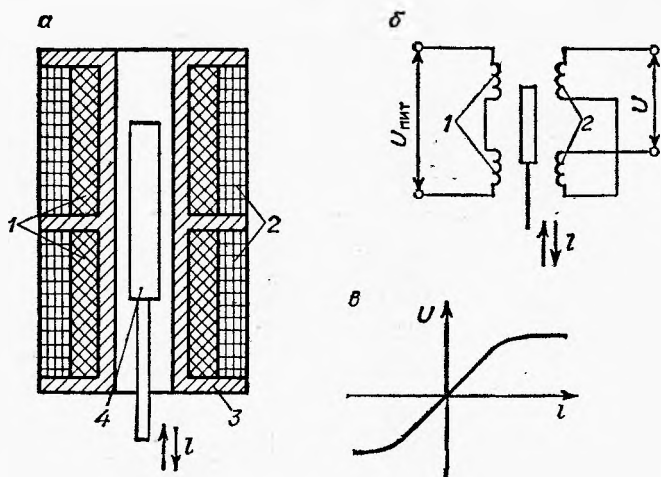


Рис. 26. Дифференциально-трансформаторный преобразователь:

а — устройство; б — электрическая схема; в — статическая характеристика; 1 — первичные обмотки; 2 — вторичные обмотки; 3 — каркас; 4 — плунжер.



направления поворота рамки. Зависимость выходного сигнала ферродинамического преобразователя — напряжения  $U$  — от входного сигнала — угла поворота рамки  $\varphi$  — приведена на рис. 27, б.

В промышленных ферродинамических преобразователях используется небольшой угол поворота рамки (обычно  $\pm 20^\circ$ ), при котором зависимость напряжения  $U$  от угла поворота  $\varphi$  остается линейной:

$$U = k\varphi, \quad (20)$$

где коэффициент пропорциональности  $k$  является коэффициентом передачи ферродинамического преобразователя.

Необходимо иметь в виду, что трансформаторный преобразователь следует включать в электрическую цепь переменного тока. При этом его выходной сигнал  $U$  будет зависеть от колебаний питающего напряжения  $U_{\text{пит}}$ , что является недостатком данной схемы. Для устранения этого недостатка приходится применять стабилизированные источники питания.

Трансформаторные преобразователи, так же, как и реостатные, преобразуют линейное перемещение в электрический сигнал. Казалось бы, для этой цели можно ограничиться реостатным преобразователем, как более простым. Однако трансформаторные преобразователи обладают существенным преимуществом перед реостатными: у них нет подвижных электрических контактов. Это преимущество является решающим при работе преобразователя в агрессивных средах, где подвижные электрические контакты ненадежны.

**Усилитель.** В измерительных цепях усилители предназначены для пропорционального усиления электрических сигналов. Различают усилители сигнала по величине — усилители напряжения или тока — и усилители сигнала по мощности — усилители мощности, не изменяющие величины усиливаемого сигнала. Усиление сигналов по величине применяется в измерительных цепях, построенных по принципу следящей системы, для

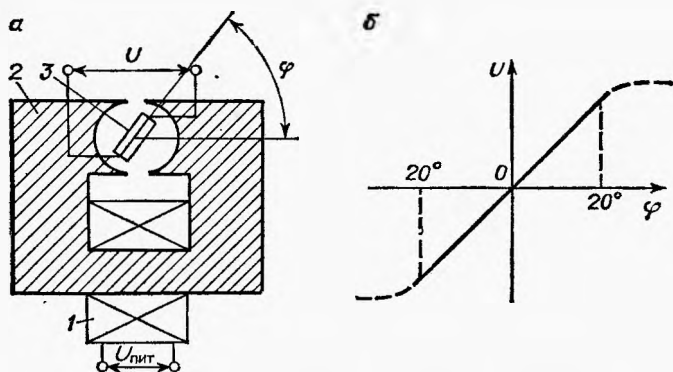


Рис. 27. Ферродинамический преобразователь:

а — устройство; б — статическая характеристика;

1 — первичная обмотка; 2 — сердечник; 3 — вторичная обмотка (рамка).

увеличения глубины обратной связи. Усилители мощности применяют обычно для устранения нагрузочного эффекта.

**Реверсивный электродвигатель.** Реверсивный электродвигатель может вращаться в разные стороны. По своим свойствам он, как преобразователь, является интегратором. Действительно, пока к нему приложено напряжение, вал электродвигателя вращается. При снятии напряжения вал останавливается. Таким образом, при наличии входного сигнала выходной сигнал такого преобразователя непрерывно изменяется, а при отсутствии его может быть любым, но неизменным.

Таким образом, наличие реверсивного электродвигателя в элементах АСР, например в измерительных приборах, позволяет придать им астатизм без применения специального интегратора.

### Контрольные вопросы

1. Как изменится выходной сигнал делителя при изменении напряжения питания, например, при его увеличении на 5 %?
2. Как изменится выходной сигнал неуравновешенного моста при изменении напряжения питания, например, при его увеличении на 5 %?
3. Как вычислить соотношение между постоянными резисторами неуравновешенного моста, если требуется, чтобы мост был уравновешен в начале диапазона измерений, т. е. при  $R_1 = R_{1н}$ ?
4. Как повлияет на работу магнитоэлектрического преобразователя изменение направления тока? изменение полярности постоянного магнита?
5. Почему для преобразования механического выходного сигнала датчика (линейного или углового перемещения) в электрический промежуточный сигнал используют трансформаторные преобразователи, а не более простые реостатные?
6. В чем преимущество дифференциально-трансформаторного преобразователя перед трансформаторным?
7. Чем отличается реверсивный электродвигатель от неререверсивного?

### § 14. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В настоящее время пневматические устройства применяются в химической, нефтехимической, газовой и других отраслях промышленности. Это объясняется простотой устройства и надежностью в эксплуатации пневматических приборов и регуляторов, а также их пожаро- и взрывобезопасностью.

В пневматической ветви ГСП используется унифицированный сигнал — давление сжатого воздуха в диапазоне от  $0,2 \cdot 10^5$  до  $1,0 \cdot 10^5$  Па. Это позволяет соединять различные приборы и регуляторы без дополнительного согласования их входных и выходных сигналов.

Все многочисленные устройства пневмоавтоматики состоят из небольшого числа элементов: пневматических резисторов, камер, измерительных элементов и др. Действие этих элементов в статике (когда воздух не движется) и в динамике (при движении воздуха) различное.

Рассмотрим основные законы пневматики.

В статике основным законом пневматики является зависимость между давлением сжатого воздуха  $p$  и вызываемой им силой  $F$ :

$$F = Sp, \quad (21)$$

где  $S$  — площадь, на которую действует давление.

Движение воздуха по трубкам, через камеры и другие элементы сопровождается трением его о стенки, внезапными сужениями, расширениями и поворотами потока. Все это создает сопротивление движению воздуха, подобно сопротивлению электрической цепи прохождению тока.

Вообще существует аналогия между расходом воздуха через элемент и силой тока в электрической цепи, перепадом давления на элементе и падением напряжения и, наконец, сопротивлением элемента движению воздуха и электрическим сопротивлением. Поэтому зависимость между расходом воздуха  $Q$  через элемент и перепадом давления на нем  $\Delta p$  аналогична закону Ома и имеет вид:

$$Q = \frac{\Delta p}{R}, \quad (22)$$

где  $R$  — пневматическое сопротивление элемента.

Эта зависимость является основным динамическим законом пневматики и часто называется пневматическим аналогом закона Ома.

Величина пневматического сопротивления любого элемента является постоянной лишь при ламинарном режиме движения, когда воздух движется через элемент параллельными струями, не перемешиваясь. С увеличением скорости возникает турбулентный режим движения, при котором воздух движется с завихрениями и перемешивается. При этом пневматическое сопротивление становится величиной переменной и зависит от перепада давления на элементе:

$$R = k \sqrt{\Delta p}, \quad (23)$$

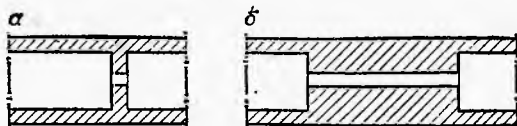
где  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Можно провести аналогию с диодом, внутреннее сопротивление которого также не является постоянным и зависит от приложенного напряжения.

Пневматическое сопротивление создается специальными устройствами — *пневматическими резисторами*, или *дросселями*. Сопротивление движению воздуха в таких устройствах достигается за счет сужения проходного сечения воздушного канала. В цепях пневмоавтоматики дроссели имеют такое же значение, что и резисторы в электрических цепях.

В зависимости от назначения дроссели разделяют на постоянные и переменные. Проходное сечение *постоянных дросселей* в процессе работы не изменяется. Они являются аналогами постоянных резисторов. У *переменных дросселей* проходное сече-

Рис. 28. Постоянные дроссели:  
 а — турбулентный; б — ламинарный.



ние можно изменять в широких пределах. Такие дроссели аналогичны переменным резисторам (например, реостатам).

По характеру движения воздуха постоянные дроссели делят на турбулентные и ламинарные. *Турбулентные дроссели* (рис. 28, а) обычно выполняют в виде жиклеров — каналов с малым отношением длины к диаметру, а *ламинарные* (рис. 28, б) в виде капилляров — каналов с большим отношением длины к диаметру.

Наиболее распространенные конструкции переменных дросселей показаны на рис. 29. На рис. 29, а представлен переменный дроссель типа цилиндр-конус, представляющий собой цилиндрическую втулку 1, вдоль которой перемещается конус 2. Проходное сечение такого дросселя зависит от положения конуса относительно цилиндра.

На рис. 29, б изображен переменный дроссель типа поршень-канавка. Он состоит из цилиндрической втулки 1 и поршня 4 с винтовой канавкой 3. Рабочая длина канавки изменяется при перемещении поршня вдоль втулки. Пневматическое сопротивление такого дросселя определяется не площадью проходного сечения, как в предыдущем случае, а длиной канавки.

На рис. 29, в показан переменный дроссель типа сопло-заслонка, состоящий из сопла 5 с цилиндрическим отверстием и заслонки 6. Пневматическое сопротивление такого дросселя зависит от величины зазора между соплом и заслонкой и изменяется при перемещении заслонки.

Пневматические дроссели применяются в схемах *делителей давления*, аналогичных делителям напряжения в электрических цепях. Простейший делитель давления состоит из двух последовательно соединенных дросселей с пневматическими сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 30). Аналогично законам электротехники перепады давления  $p_1 - p_2$  и  $p_2 - p_3$  на дросселях

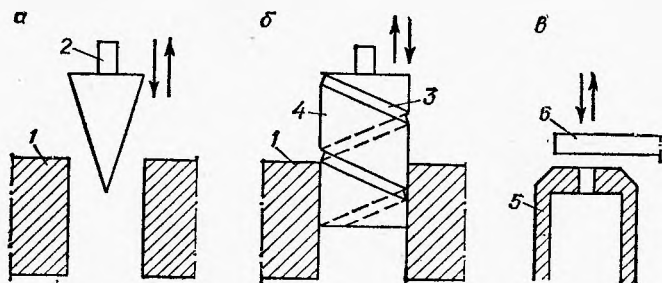


Рис. 29. Переменные дроссели:

а — цилиндр-конус; б — поршень-канавка; в — сопло-заслонка;  
 1 — втулка; 2 — конус; 3 — канавка; 4 — поршень; 5 — сопло; 6 — заслонка.

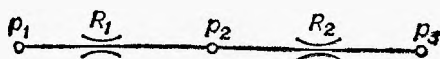


Рис. 30. Делитель давления.

делителя давления пропорциональны их пневматическим сопротивлениям  $R_1$  и  $R_2$ :

$$\frac{p_1 - p_2}{p_2 - p_3} = \frac{R_1}{R_2} \quad (24)$$

Из этой формулы можно найти промежуточное давление  $p_2$ :

$$p_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} p_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} p_3 \quad (25)$$

Промежуточное давление, как видно из формулы (25), — результат сложения двух давлений  $p_1$  и  $p_3$ , умноженных на соответствующие коэффициенты. Поэтому схема делителя, приведенная на рис. 30, часто называется *дрессельным сумматором*.

Если воздух после второго дресселя выходит в атмосферу, то  $p_3 = 0$ . В этом случае формула (25) примет вид:

$$p_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} p_1 \quad (26)$$

Рассмотрим теперь устройство и принцип действия пневматических элементарных преобразователей, наиболее распространенные из которых указаны в табл. 5.

**Мембрана.** Это зажатый между фланцами гофрированный диск, чаще всего из прорезиненной ткани, с жестким диском в центре (рис. 31). Мембрана преобразует давление в силу. Так как эта сила  $F$ , согласно формуле (21), пропорциональна приложенному давлению  $p$ , то статическая характеристика мембраны, как преобразователя, линейная.

**Трубчатая пружина.** Представляет собой согнутую в виде дуги трубку овального сечения (рис. 32). Один конец трубки запаян, а в другой, укрепленный неподвижно, подают измеряемое давление. Под действием давления  $p$  трубка стремится распрямиться, вследствие чего ее свободный запаянный конец перемещается. Это перемещение  $l$  пропорционально измеряемому давлению  $p$ :

$$l = kp, \quad (27)$$

где коэффициент пропорциональности  $k$  — коэффициент передачи трубчатой пружины как преобразователя.

Таблица 5. Пневматические элементарные преобразователи

Преобразователь	Входной сигнал	Выходной сигнал
Мембрана	Давление	Сила
Трубчатая пружина	»	Линейное перемещение
Сильфон	»	Сила или линейное перемещение
Сопло-заслонка	Линейное перемещение	Давление
Усилитель мощности	Давление	Давление

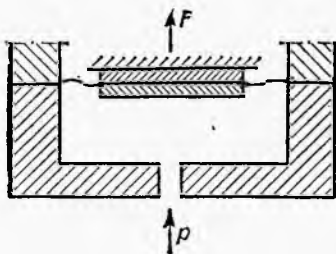


Рис. 31. Мембрана.

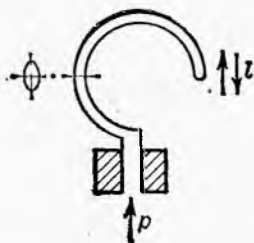


Рис. 32. Трубочатая пружина.

**Сильфон.** Это гофрированная трубка, один конец которой закрыт (дно сильфона), а к другому подводится давление  $p$  (рис. 33). Под действием давления сильфон растягивается. Зависимость перемещения дна сильфона  $l$  от измеряемого давления  $p$ , как и в трубчатой пружине, выражается формулой (27).

Если перемещению дна сильфона препятствует неподвижная опора, то выходным сигналом сильфона является не перемещение, а сила  $F$ , действующая на опору. Зависимость этой силы от давления  $p$  выражается формулой (21), из которой видно, что эта характеристика сильфона также линейная.

**Преобразователь сопло-заслонка.** Для преобразования линейного перемещения в давление сжатого воздуха применяют переменный дроссель типа сопло — заслонка в сочетании с постоянным дросселем (рис. 34, а). Постоянный дроссель  $R_1$  вместе с переменным дросселем сопло — заслонка  $R_2$  образует делитель давления.

Давление питания  $p_1$  подводится к постоянному дросселю  $R_1$ , а выходным сигналом делителя является промежуточное

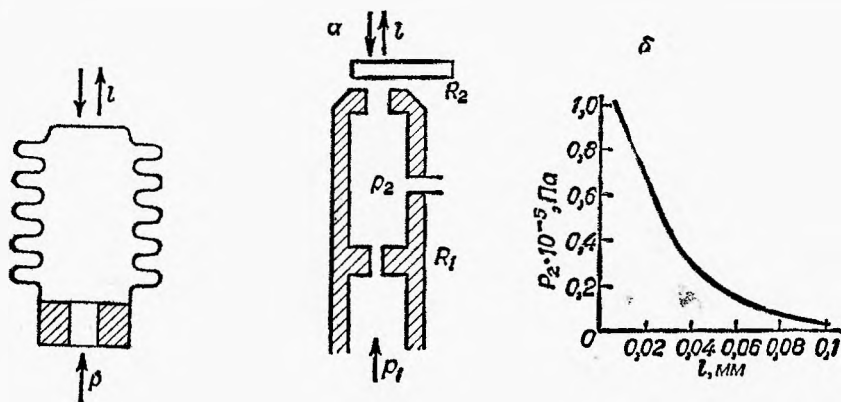


Рис. 33. Сильфон.

Рис. 34. Преобразователь сопло-заслонка:  
а — устройство; б — статическая характеристика

давление  $p_2$ . Это давление, согласно формуле (26), зависит от изменяемого сопротивления дросселя  $R_2$  и, следовательно, от перемещения заслонки  $l$ .

На рис. 34, б дана статическая характеристика элементарного преобразователя сопло-заслонка — зависимость давления  $p_2$  от перемещения заслонки  $l$  при давлении питания  $p_1 = 1,4 \cdot 10^5$  Па.

**Усилитель мощности.** Все элементы и устройства пневмоавтоматики соединяются пневматическими линиями связи — пневмопроводами. Пневмопровод может быть как коротким (например, при соединении элементов внутри одного устройства), так и длинным (например, при передаче унифицированных пневматических сигналов между преобразователями).

Пневмопровод представляет собой металлическую или пластмассовую трубку внутренним диаметром 4—6 мм. Для удобства монтажа пневматических линий применяют пневмокабели — несколько пневмопроводов, заключенных в гибкую оболочку.

Наиболее важной характеристикой пневмопровода является время, в течение которого давление на его выходе изменяется после изменения давления на входе. Чем длиннее пневмопровод, тем это время больше, так как для любого изменения давления требуется приток или стравливание некоторого количества воздуха.

Для повышения быстродействия пневматических устройств необходимо, чтобы изменение давления сопровождалось достаточно большим расходом воздуха в пневмопроводе, т. е. следует усиливать мощность пневматического сигнала без искажения его величины. Эта операция производится усилителями мощности, которые обеспечивают на своем выходе быстрое повторение входного сигнала даже при значительной длине пневмопровода.

Обычно усилитель мощности является последним элементом в устройствах с пневматическим выходом, например, промежуточных преобразователях. Если же длина пневмопровода велика, то через каждые 300 м устанавливают дополнительные усилители мощности.

### Контрольные вопросы

1. Сравните пневматический аналог закона Ома и закон Ома для электрической цепи. Найдите в них подобные составляющие.
2. Как определить пневматическое сопротивление элемента, зная перепад давления и расход воздуха через него? Можно ли это сделать, если воздух неподвижен?
3. В чем разница между ламинарным и турбулентным режимами движения? между ламинарным и турбулентным дросселями?
4. В чем разница между постоянным и переменным пневматическими дросселями?
5. Почему последовательное соединение двух пневматических дросселей называется дроссельным сумматором?

6. Какое из давлений,  $p_1$ ,  $p_2$  или  $p_3$  (рис. 30), является выходным сигналом делителя давления?
7. Во сколько раз увеличится сила  $F$ , развиваемая мембраной, если ее диаметр увеличить в 2 раза?
8. Куда будет перемещаться свободный конец трубчатой пружины под действием давления? вакуума?
9. Зависит ли перемещение штока от давления воздуха снаружи?
10. Чему будет равен выходной сигнал преобразователя сопло — заслонка, если заслонка полностью закроет выходное отверстие?
11. Какой недостаток пневмоавтоматики устраняют усилители мощности?

## ГЛАВА IV

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

#### § 15. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Промежуточные преобразователи предназначены для преобразования механических выходных сигналов датчиков (силы, перемещения) в унифицированные промежуточные сигналы; преобразования не унифицированных электрических сигналов датчиков (электрическое сопротивление, э. д. с.) в унифицированные электрические сигналы; преобразования унифицированных пневматических сигналов в унифицированные электрические и наоборот.

Наибольшее распространение получили промежуточные преобразователи первой группы, поскольку большинство датчиков для измерения таких распространенных технологических параметров, как давление, уровень и расход, имеют механический выходной сигнал. Промежуточные преобразователи этой группы всегда составляют с датчиком одно устройство.

Преобразователи второй группы обычно применяют с датчиками температуры в случаях, когда сигналы необходимо передавать в устройство, имеющее только унифицированный вход, например УВМ.

Преобразователи третьей группы позволяют переходить от пневматической ветви ГСП к электрической и наоборот. Такой переход обычно необходим при управлении технологическими процессами, которые ведутся в пожаро- и взрывоопасных условиях. Если управление таким процессом ведется с помощью локальных АСР, то применяют элементы пневматической ветви ГСП или электрические, конструкция которых позволяет применять их во взрывоопасных помещениях. Если же используется АСУ ТП, то сигналы из цеха к УВМ и от УВМ в цех передаются через пневмоэлектрические и электропневматические промежуточные преобразователи.

Промежуточный преобразователь представляет собой комбинацию элементарных преобразователей, обеспечивающую



Таблица 6. Виды преобразования сигналов в промежуточных преобразователях

Входной сигнал	Выходной сигнал	Входной сигнал	Выходной сигнал
Сила	Давление сжатого воздуха	Э. д. с. термопары	Ток
Ток	То же	Электрическое сопротивление термометра	»
Сила	Ток	Напряжение переменного тока	»
Давление сжатого воздуха	»		

заданные метрологические характеристики: погрешность, стабильность, линейность, чувствительность. В большинстве преобразователей используется наиболее точный метод измерения — нулевой. Поэтому промежуточные преобразователи, как правило, представляют собой астатические следящие системы или статические с глубокой обратной связью, подобно изображенному на рис. 17.

В качестве промежуточных применяются также и элементарные преобразователи, работающие по методу непосредственной оценки. Для этой цели применяют лишь трансформаторные и мостовые преобразователи, так как они обеспечивают достаточно хорошие метрологические характеристики без дополнительных устройств.

Все промежуточные преобразователи пневматической ветви ГСП имеют одинаковый выходной унифицированный сигнал — давление сжатого воздуха от  $0,2 \cdot 10^5$  до  $1,0 \cdot 10^5$  Па. В отличие от пневматической, электрическая ветвь ГСП допускает использование различных выходных сигналов. Среди промежуточных преобразователей с электрическим выходом наибольшее распространение получили преобразователи с выходным сигналом в виде постоянного тока, изменяющегося от 0 до 5 или от 4 до 20 мА. Такой выходной сигнал позволяет к одному промежуточному преобразователю подключить последовательно несколько потребителей: измерительные приборы, регуляторы, машины централизованного контроля и системы управления. Наиболее распространенные виды преобразования сигналов в промежуточных преобразователях приведены в табл. 6.

**Преобразователь силы в давление сжатого воздуха.** Такой преобразователь (рис. 35, а) состоит из рычага 1, сопла с заслонкой 4, сильфона 6, а также пневматического усилителя мощности 5.

Входным сигналом преобразователя является сила  $F$ , приложенная к левому плечу рычага  $a$ , а выходным — давление сжатого воздуха  $p$  на выходе усилителя мощности.

На рис. 35, б приведена структурная схема преобразователя, из которой видно, что его можно представить в виде последовательного соединения двух преобразователей: преобразователя

измеряемой силы  $F$  в момент  $M$  (приложенный к рычагу  $1$ ) и преобразователя этого момента в выходное давление  $p$ . Второй преобразователь представляет собой следящую систему, в которой обратным преобразователем является сиффон  $б$  вместе с правым плечом рычага  $б$ . Рычаг одновременно выполняет функции преобразования приложенных к нему сил  $F$  и  $F_M$  в моменты  $M$  и  $M_M$  (преобразователи  $a$  и  $b$ ), вычитания этих моментов (сумматор  $C$ ) и интегратора ( $И$ ).

Рассмотрим принцип действия преобразователя. К рычагу  $1$  приложены измеряемая сила  $F$  и сила  $F_M$ , создаваемая сиффоном  $б$ . Эти силы создают на рычаге противоположно направленные моменты:

$$M = aF; \quad (28)$$

$$M_M = bF_M, \quad (29)$$

где  $a$  и  $b$  — длины плеч рычага.

Результирующий вращающий момент  $\Delta M = M - M_M$  вызывает поворот рычага  $1$  и перемещение  $l$  расположенной на нем заслонки элементарного преобразователя сопло-заслонка  $3-4$ . Выходной сигнал этого преобразователя — давление сжатого воздуха  $p_1$  — после усиления по мощности в усилителе  $5$  становится выходным сигналом  $p$  всего преобразователя. Этот выходной сигнал подается на вход обратного преобразователя — сиффона  $б$ , замыкая тем самым контур обратной связи.

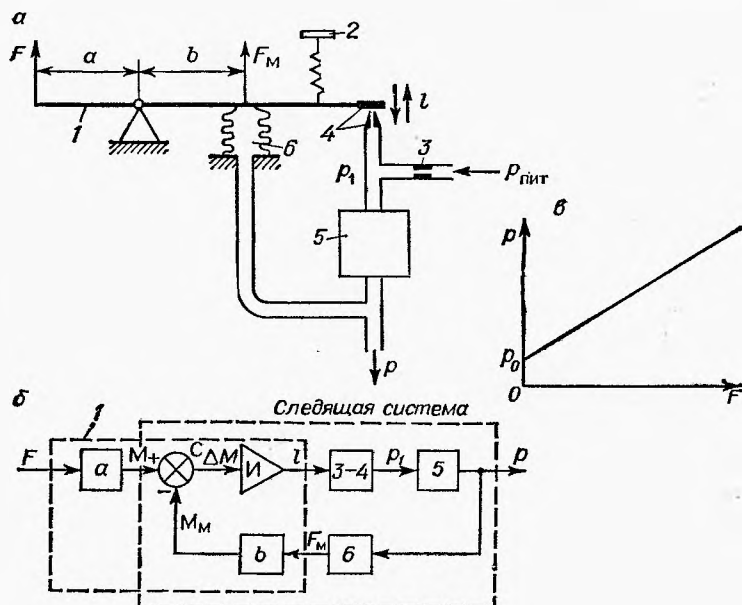


Рис. 35. Преобразователь силы в давление сжатого воздуха:

$a$  — устройство;  $б$  — структурная схема;  $a$  — статическая характеристика;  $1$  — рычаг;  $2$  — корректор нуля;  $3$  — постоянный дроссель;  $4$  — сопло с заслонкой;  $5$  — усилитель мощности;  $б$  — сиффон;  $a, б$  — плечи рычага;  $C$  — сумматор;  $И$  — интегратор.

Наличие в следящей системе интегратора  $I$  в виде рычага  $l$  делает ее астатической. Следовательно, в установившемся состоянии такой системы, как было показано в § 5, рассогласование равно нулю. Так как в рассматриваемом преобразователе рассогласованием является разность моментов  $\Delta M$ , то моменты  $M$  и  $M_m$  при этом оказываются равными. Это означает, что связь выходного сигнала следящей системы  $p$  с ее входным сигналом  $M$  такая же, как с сигналом  $M_m$ . Но, как видно из структурной схемы, момент  $M_m$  — результат преобразования выходного давления  $p$  двумя преобразователями в цепи обратной связи: сильфоном  $b$  и плечом рычага  $b$ .

Таким образом, статическая характеристика всей следящей системы как преобразователя момента  $M$  в давление  $p$  определяется только статической характеристикой цепи обратной связи.

Найдем статическую характеристику цепи обратной связи. Для сильфона в соответствии с формулой (21) имеем:

$$F_m = Sp. \quad (30)$$

Подставляя это выражение в формулу для рычага (29), получим статическую характеристику всей цепи обратной связи:

$$M_m = bSp. \quad (31)$$

Искомая статическая характеристика следящей системы получается из уравнения (31), если заменить в нем  $M_m$  на  $M$  и затем решить относительно  $p$ :

$$p = \frac{1}{bS} M. \quad (32)$$

Теперь можно получить статическую характеристику всего преобразователя. Для этого достаточно заменить момент  $M$  силой  $F$  по формуле (28):

$$p = kF, \quad (33)$$

где коэффициент пропорциональности  $k = \frac{a}{bS}$  — коэффициент передачи преобразователя.

Тот факт, что статическая характеристика астатической следящей системы определяется только характеристикой обратной связи, является важным свойством следящих систем как измерительных устройств. Благодаря этому свойству метрологические требования ко всей системе могут быть выполнены в результате выбора преобразователя в цепи обратной связи с необходимой характеристикой. При этом в прямой цепи следящей системы могут быть применены преобразователи с низкими метрологическими качествами.

Так, в нашем случае перемещение рычага  $l$  преобразуется в выходное давление  $p$  преобразователем сопло-заслонка и усилителем мощности. Такое преобразование, как видно из рис. 34, б, является нелинейным и, кроме того, зависит от давления питания  $p_{пит}$ .

В преобразователе имеется корректор нуля 2 (пружина). Изменяя натяжение пружины, можно создавать дополнительный вращающий момент на рычаге и тем самым изменять величину выходного сигнала преобразователя при неизменном значении входного. При наладке преобразователя корректором устанавливается начальное значение выходного давления ( $p_0 = 0,2 \cdot 10^5$  Па) при нулевом значении измеряемой силы  $F$ .

С учетом влияния корректора статическая характеристика преобразователя силы в давление сжатого воздуха примет вид:

$$p = p_0 + kF. \quad (34)$$

График этой характеристики приведен на рис. 35, в.

Следует подчеркнуть, что в данном преобразователе с помощью астатической следящей системы реализуется нулевой метод измерения. При этом роль переменной меры играют преобразователи в цепи обратной связи. Такой же прием используется во всех промежуточных преобразователях, которые будут описаны ниже.

Рассмотренный преобразователь может служить и для преобразования перемещения в давление сжатого воздуха. В этом случае перед ним включают дополнительный преобразователь перемещения в силу (например, пружину).

Для преобразования силы в давление сжатого воздуха промышленность выпускает преобразователи, обычно объединенные в один блок с первичными преобразователями, имеющими выходной сигнал в виде силы. Поэтому для них регламентируются лишь предельное расстояние передачи выходного сигнала по пневмотрассе (300 м) и постоянная времени (равная 7 с) при работе преобразователя на туиковую импульсную трубку длиной 60 м и внутренним диаметром 6 мм. Эта постоянная времени обусловлена нагрузочным эффектом и зависит от мощности выходного сигнала, для повышения которого и применен пневматический усилитель мощности.

Предельное значение силы  $F$ , измеряемой преобразователем, для различных моделей — от 10 до 100 Н.

**Преобразователь тока в давление сжатого воздуха.** Такой преобразователь (рис. 36, а) состоит из рычага 1, преобразователя сопло-заслонка 3—4, сильфона 6, магнитоэлектрического преобразователя 7, а также пневматического усилителя мощности 5.

Входным сигналом преобразователя является ток  $i$  в катушке магнитоэлектрического преобразователя, а выходным — давление сжатого воздуха  $p$  на выходе усилителя мощности.

Сравнив этот преобразователь с рассмотренным выше, можно заметить, что он представляет собой последовательное соединение двух преобразователей (рис. 36, б). Первый — магнитоэлектрический преобразователь 7 входного тока  $i$  в силу  $F$ . Второй — преобразователь 8 этой силы в выходное давление сжатого воздуха  $p$ . Так как статические характеристики обоих

преобразователей линейны, то и статическая характеристика всего преобразователя тока в давление сжатого воздуха также линейна.

Статическая характеристика преобразователя приведена на рис. 36, в.

Установка начального значения выходного давления  $p_0 = 0,2 \cdot 10^5$  Па при нулевом входном токе производится корректором нуля 2.

Для преобразования тока в давление сжатого воздуха промышленность выпускает преобразователи типа ЭПП-63. Метрологические характеристики этого преобразователя по выходному сигналу аналогичны характеристикам преобразователя силы в давление сжатого воздуха. Кроме них для него регламентируется выходное сопротивление предыдущего измерительного преобразователя (приблизительно 1500 Ом), так как от этого сопротивления зависит дополнительная погрешность из-за нагрузочного эффекта.

**Преобразователь силы в ток.** Преобразователь (рис. 37, а) состоит из рычага 1, дифференциально-трансформаторного преобразователя 3, магнитоэлектрического преобразователя 5, а также электронного усилителя 4 с выпрямителем переменного тока.

Входным сигналом преобразователя является сила  $F$ , приложенная к левому плечу рычага  $a$ , а выходным — ток  $i$  на выходе усилителя.

Структурная схема преобразователя приведена на рис. 37, б. Из схемы видно, что его можно представить в виде двух последовательно соединенных преобразователей: преобразователя измеряемой силы  $F$  в момент  $M$  (приложенный к рычагу 1) и преобразователя этого момента в выходной сигнал  $i$ . Второй преобразователь представляет собой следящую систему, в цепь

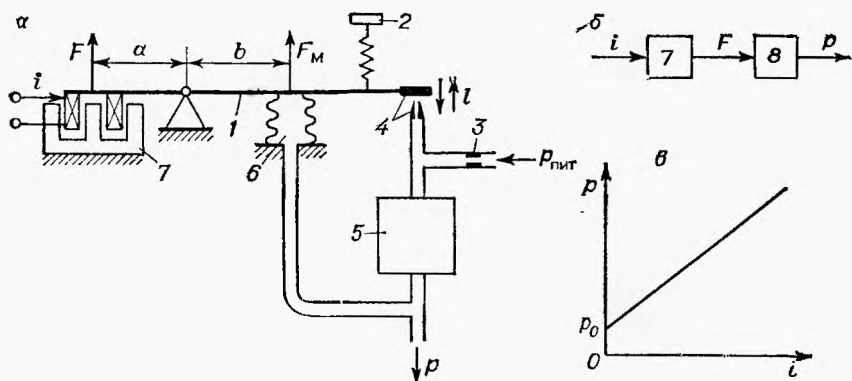


Рис. 36. Преобразователь тока в давление сжатого воздуха:

а — устройство; б — структурная схема; в — статическая характеристика; 1 — рычаг; 2 — корректор нуля; 3 — постоянный дроссель; 4 — сопло с заслонкой; 5 — усилитель мощности; 6 — сильфон; 7 — магнитоэлектрический преобразователь; 8 — преобразователь силы в давление сжатого воздуха.

обратной связи которой включен магнитоэлектрический преобразователь 5 вместе с правым плечом рычага  $b$ . Рычаг выполняет те же функции, что и в преобразователях двух рассмотренных выше типов.

Принципы действия этих преобразователей во многом схожи. Здесь на рычаг 1 также действуют две силы: измеряемая сила  $F$  и сила  $F_M$ , создаваемая магнитоэлектрическим преобразователем 5. Моменты этих сил  $M$  и  $M_M$  сравниваются на рычаге и результирующий вращающий момент  $\Delta M$  вызывает поворот рычага и перемещение  $l$  прикрепленного к нему плунжера дифференциально-трансформаторного преобразователя 3. Этот преобразователь преобразует перемещение  $l$  в напряжение переменного тока  $U$ , которое затем усиливается и выпрямляется в электронном усилителе 4. Выходной сигнал усилителя — постоянный ток  $i$  — проходит через внешнюю нагрузку (например, миллиамперметр) и катушку магнитоэлектрического преобразователя 5, включенные последовательно. Иначе говоря, выходной сигнал преобразователя — ток  $i$  — подается на вход магнитоэлектрического преобразователя, замыкая тем самым контур обратной связи следящей системы.

Наличие интегратора И (рычага) делает эту систему астатической аналогично следящей системе на рис. 35, б. Поэтому статическая характеристика системы также определяется статической характеристикой цепи обратной связи. Магнитоэлектрический преобразователь в этой цепи имеет линейную характеристику и поэтому статическая характеристика всей следящей системы — зависимость тока  $i$  от момента  $M$  — также линейна. А так как характеристика преобразователя  $a$  силы  $F$  в момент  $M$  линейная, то и статическая характеристика всего

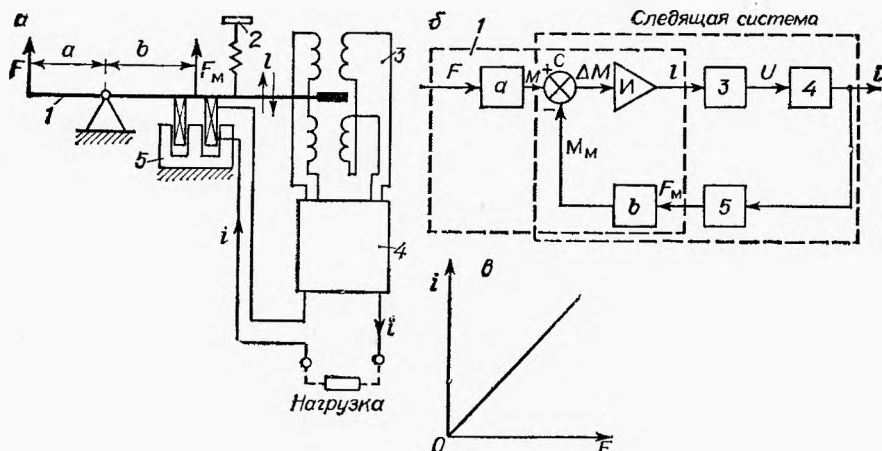


Рис. 37. Преобразователь силы в ток:

$a$  — устройство;  $б$  — структурная схема;  $в$  — статическая характеристика; 1 — рычаг; 2 — корректор нуля; 3 — дифференциально-трансформаторный преобразователь; 4 — усилитель; 5 — магнитоэлектрический преобразователь.

преобразователя оказывается также линейной. Эта характеристика приведена на рис. 37, в.

Промышленность выпускает преобразователь силы в ток, который состоит из двух отдельных блоков. Один блок включает в себя элементы, имеющие механическую связь между собой: рычаг, дифференциально-трансформаторный преобразователь и магнитоэлектрический преобразователь. Вторым блоком преобразователя является электронный усилитель. Расстояние между блоками должно быть не более 3 м при монтаже линии связи незранированным кабелем и не более 100 м при монтаже экранированным кабелем. Сопротивление нагрузки — не более 2500 Ом.

Измерительные приборы или другие потребители, например регулятор, могут быть подключены к преобразователю по двум схемам: измерения тока или измерения напряжения. В первом случае несколько потребителей соединяются последовательно друг с другом, во втором — параллельно специальному нагрузочному резистору.

В преобразователе имеется корректор нуля 2 — пружина, натяжением которой устанавливают нулевое значение выходного тока при нулевом значении измеряемой силы.

Максимальная сила, измеряемая преобразователем, в зависимости от модели, — от 10 до 100 Н.

**Преобразователь давления сжатого воздуха в ток.** Такой преобразователь (рис. 38, а) состоит из трубчатой пружины 3, пружины 4, рычага 1, колебательного контура 5, специального усилителя 6 и магнитоэлектрического преобразователя 7.

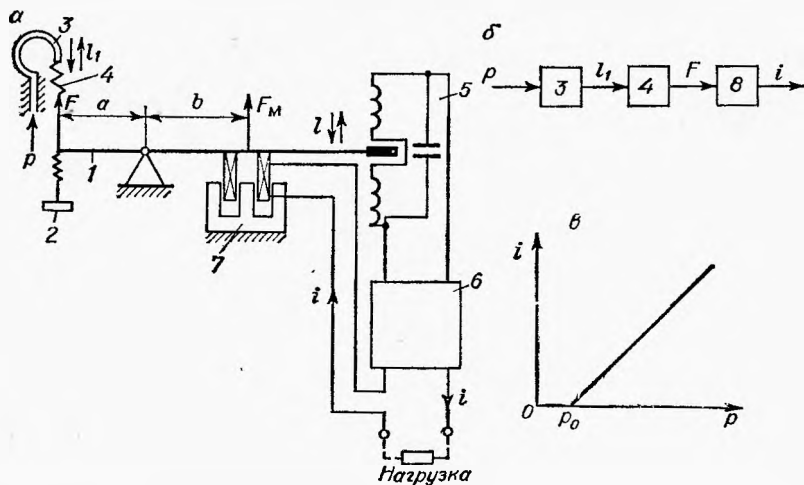


Рис. 38. Преобразователь давления сжатого воздуха в ток;

а — устройство; б — структурная схема; в — статическая характеристика; 1 — рычаг; 2 — корректор нуля; 3 — трубчатая пружина; 4 — пружина; 5 — колебательный контур; 6 — усилитель; 7 — магнитоэлектрический преобразователь; 8 — преобразователь силы в ток.

Входным сигналом преобразователя является давление сжатого воздуха  $p$ , подаваемое в трубчатую пружину, а выходным — ток  $i$ .

Структурная схема преобразователя приведена на рис. 38, б. Как видно из схемы, преобразователь представляет собой последовательное соединение трех преобразователей. Первый — преобразователь 3 давления сжатого воздуха  $p$  в перемещение  $l_1$  конца трубчатой пружины, второй — преобразователь 4 этого перемещения в силу  $F$ , приложенную к левому плечу рычага  $a$ . Статические характеристики обоих этих преобразователей, как известно из § 12 и 14, линейны. Третий преобразователь 8 силы  $F$  в выходной ток  $i$  почти аналогичен предыдущему. Отличается он лишь тем, что перемещение  $l$  преобразуется не в напряжение переменного тока  $U$ , а в резонансную частоту колебательного контура 5 и затем усилителем 6 — в выходной ток  $i$ .

Статическая характеристика преобразователя 8 определяется характеристикой магнитоэлектрического преобразователя 7 и поэтому линейна. Следовательно, рассмотренный преобразователь, измерительная цепь которого состоит из трех преобразователей, имеет линейную статическую характеристику (рис. 38, в).

Для преобразования давления сжатого воздуха в ток промышленность выпускает преобразователь типа ПЭ-55М. К нему может быть подключено несколько потребителей. Схемы и условия их подключения такие же, как для преобразователя силы в ток.

В преобразователе имеется корректор нуля 2, изменяющий натяжение пружины 4. Этим корректором устанавливают нулевое значение выходного тока при начальном значении измеряемого давления  $p_0$ .

**Преобразователь э. д. с. термопары в ток.** Для преобразования э. д. с. термопары\* в унифицированный токовый сигнал применяют нормирующий преобразователь. Преобразователь (рис. 39, а) состоит из усилителя 1 с выпрямителем и блока линеаризации 2.

Входным сигналом преобразователя является э. д. с. термопары  $U$ , выходным — ток  $i$ .

Из структурной схемы преобразователя (рис. 39, б) видно, что он представляет собой следящую систему. В прямой цепи этой системы включен усилитель напряжения 1, во входной цепи которого производится вычитание сигналов  $U$  и  $U_m$ . Следовательно, входная цепь усилителя выполняет функцию сумматора  $S$ . В цепь обратной связи включен блок линеаризации 2, преобразующий выходной ток  $i$  в напряжение обратной связи  $U_m$ .

\* Принцип действия и устройство термопары рассмотрены в § 20.



Рассмотрим принцип действия преобразователя. К входу усилителя 1 приложена разность  $\Delta U$  измеряемой э. д. с.  $U$  и напряжения обратной связи  $U_m$ . Эта разность усиливается усилителем, и его выходной ток  $i$  проходит через внешнюю нагрузку и блок линейризации 2, включенные последовательно. Поэтому ток  $i$  является одновременно выходным сигналом всего преобразователя и входным сигналом преобразователя в цепи обратной связи. Выходной сигнал этого преобразователя — напряжение  $U_m$  — подается во входную цепь усилителя, замыкая тем самым цепь обратной связи.

Из структурной схемы преобразователя видно, что в ней отсутствует интегратор. Поэтому преобразователь представляет собой статическую следящую систему. В такой системе, как известно, в установившемся состоянии имеется статическая ошибка: напряжение  $\Delta U$  не равно нулю. Однако глубина обратной связи в этой следящей системе выбирается настолько большой, чтобы статической ошибкой можно было пренебречь. Тогда выходной сигнал обратного преобразователя  $U_m$  можно считать равным измеряемому сигналу  $U$ . Следовательно, зависимость выходного тока  $i$  от входной э. д. с.  $U$  (статическая характеристика преобразователя), так же как и в астатической системе, определяется только статической характеристикой преобразователя в цепи обратной связи — блока линейризации 2. Характеристика блока линейризации выбирается такой, чтобы скомпенсировать нелинейность характеристики первичного преобразователя — термопары 3. Таким способом достигается линейная зависимость выходного тока от измеряемой температуры  $T$ . Статическая характеристика преобразователя приведена на рис. 39, в.

Промышленность выпускает преобразователь НП-ТЛ1-М для работы в одном из стандартных диапазонов температур совместно с термопарами различных типов. Сопротивление нагрузки преобразователя не должно превышать 2,5 кОм, а сопротивление линии связи с первичным преобразователем — 150 Ом.

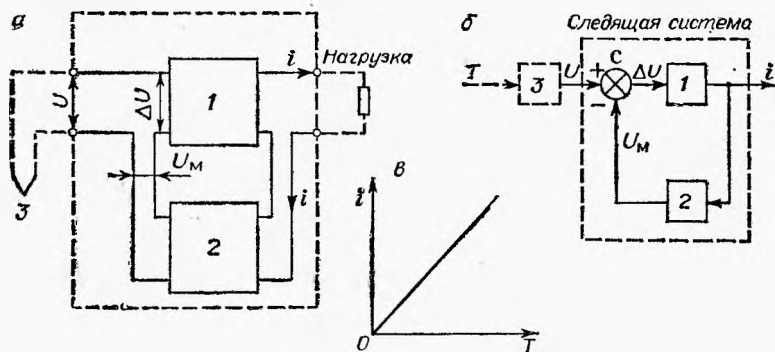


Рис. 39. Преобразователь э. д. с. термопары в ток:

а — блок-схема; б — структурная схема; в — статическая характеристика; 1 — усилитель; 2 — блок линейризации; 3 — термопара.

В преобразователе имеются корректор нуля выходного тока и кнопка «Репер» для проверки исправности преобразователя. При нажатии на кнопку «Репер» должен устанавливаться выходной сигнал  $4,5 \pm 0,24$  мА.

**Преобразователь электрического сопротивления термометра в ток.** Для преобразования электрического сопротивления термометра сопротивления\* в унифицированный токовый сигнал применяют нормирующий преобразователь (рис. 40, а). Он состоит из неуравновешенного моста 3, усилителя 1 и блока линейризации 2. Входным сигналом преобразователя является электрическое сопротивление термометра  $R$ , а выходным — ток  $i$ . Из структурной схемы преобразователя (рис. 40, б) видно, что он представляет собой последовательное соединение двух преобразователей. Первый из них — неуравновешенный мост 3, преобразующий электрическое сопротивление  $R$  в напряжение  $U$ , второй — преобразователь 4, преобразующий это напряжение в ток  $i$ . Преобразователь 4 аналогичен преобразователю э. д. с. в ток.

Характеристика блока линейризации 2 преобразователя выбирается такой, чтобы скомпенсировать нелинейность статических характеристик неуравновешенного моста 3 и первичного преобразователя — термометра сопротивления 5. Таким образом достигается линейная зависимость выходного тока от измеряемой температуры  $T$ . Статическая характеристика преобразователя приведена на рис. 40, в.

Для работы в одном из стандартных диапазонов температур совместно с термометрами сопротивления различных типов промышленностью выпускаются преобразователи НП-СЛ1-М.

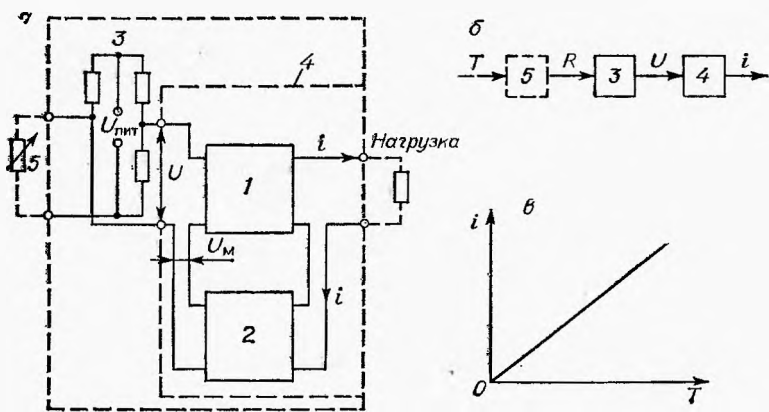


Рис. 40. Преобразователь электрического сопротивления в ток:

а — блок-схема; б — структурная схема; в — статическая характеристика; 1 — усилитель; 2 — блок линейризации; 3 — неуравновешенный мост; 4 — преобразователь напряжения в ток; 5 — термометр сопротивления.

\* Принцип действия и устройство термометра сопротивления рассмотрены в § 20.

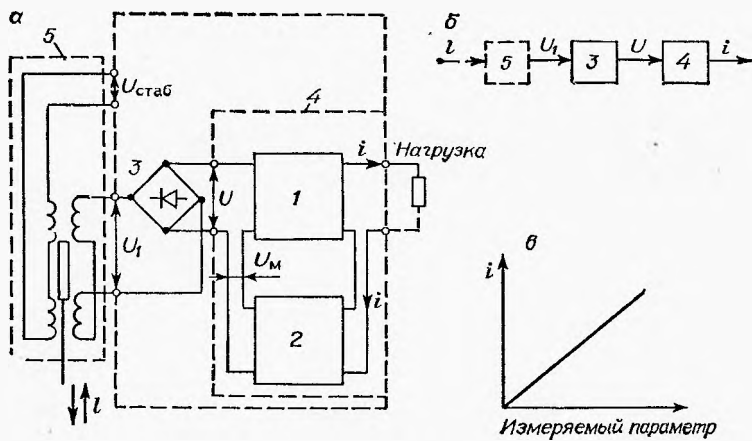


Рис. 41. Преобразователь напряжения переменного тока в ток:

*a* — блок-схема; *б* — структурная схема; *в* — статическая характеристика; 1 — усилитель; 2 — блок линейаризации; 3 — выпрямитель; 4 — преобразователь напряжения в ток; 5 — дифференциально-трансформаторный преобразователь.

Сопротивление нагрузки преобразователя, включая сопротивление линии связи, не должно превышать 2,5 кОм.

В преобразователе НП-СЛ1-М, как и в НП-ТЛ1-М, имеются корректор нуля выходного тока и кнопка «Репер». Кроме того, на переднюю панель преобразователя выведен подгоночный резистор, сопротивление которого подбирается так, чтобы разница сопротивлений проводов, соединяющих термометр сопротивления с преобразователем, не превышала 0,05 Ом.

**Преобразователь напряжения переменного тока в ток.** Этот преобразователь (рис. 41, *a*) обычно применяют в качестве нормирующего для преобразования в унифицированный токовый сигнал выходного сигнала дифференциально-трансформаторного преобразователя 5. При такой схеме включения дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещение  $l$  его плунжера преобразуется в напряжение переменного тока  $U_1$ . При этом, как указывалось в § 13, необходимо стабилизировать напряжение питания преобразователя, для чего предусмотрен стабилизированный источник питания с напряжением  $U_{\text{стаб}}$ .

Преобразователь состоит из выпрямителя 3, усилителя 1 и блока линейаризации 2. Назначение усилителя и блока линейаризации то же, что и в преобразователе э. д. с. в ток.

Входным сигналом преобразователя является напряжение переменного тока  $U_1$ , выходным — ток  $i$ .

Из структурной схемы преобразователя (рис. 41, *б*) видно, что он представляет собой последовательно включенные выпрямитель 3 и преобразователь 4, который аналогичен преобразователю э. д. с. в ток,

Выпрямитель 3 преобразует входное напряжение переменного тока  $U_1$  во входной сигнал преобразователя 4 — напряжение постоянного тока  $U$ . Выходным сигналом преобразователя 4 является ток  $i$ . Линейная зависимость выходного тока от параметра, измеряемого дифференциально-трансформаторным преобразователем 5, достигается настройкой характеристики блока линейризации 2.

Статическая характеристика преобразователя (относительно измеряемого параметра) дана на рис. 41, в.

Для преобразования напряжения переменного тока в ток промышленностью выпускаются преобразователи типа НП-ПЗ.

Сопrotивление нагрузки преобразователя не должно превышать 2,5 кОм, а сопротивление линии связи с дифференциально-трансформаторным преобразователем — 20 Ом на каждый провод.

Органы настройки преобразователя выведены на переднюю панель. Ручкой «Корректор» устанавливается нулевое значение выходного тока при нулевом значении измеряемого параметра на входе первичного преобразователя, а ручкой «Чувствительность» — максимальное значение выходного тока (5 мА) при максимальном значении измеряемого параметра.

Для периодического контроля исправности преобразователя на передней панели расположены три пары гнезд. Гнезда «П» служат для контроля напряжения питания первичной обмотки дифференциально-трансформаторного преобразователя (24 В), гнезда «Д» — для контроля его выходного напряжения (от 0 до 2 В), гнезда «В» — для проверки выходного сигнала преобразователя. К гнездам «В» подключается милливольтметр, показания которого должны изменяться от 0 до 102 мВ при изменении выходного тока от 0 до 5 мА.

### Контрольные вопросы

1. Как изменится максимальное значение входного сигнала преобразователей силы и тока в давление сжатого воздуха (рис. 35, 36) и силы и давления в ток (рис. 37, 38) при изменении длины плеча  $a$  рычага? при изменении длины плеча  $b$ ?
2. Как изменятся статические характеристики преобразователей силы и тока в давление сжатого воздуха при колебаниях давления питания?
3. Как изменятся статические характеристики преобразователей силы и давления в ток при колебаниях напряжения питания усилителей?
4. Каково назначение пневматических усилителей мощности в преобразователях силы и тока в давление?
5. Как изменятся статические характеристики преобразователей силы и тока в давление и силы и давления в ток при натяжении пружины корректора нуля? при отпускании пружины корректора нуля?
6. Какие из рассмотренных преобразователей представляют собой статические следящие системы, а какие — астатические? Какой элемент выполняет функцию интегратора в астатических системах?
7. Для чего в преобразователях э. д. с. термомпары, сопротивления термометра и напряжения переменного тока в ток в цепи обратной связи применяют преобразователь с нелинейной статической характеристикой?

Измерительные приборы предназначены для преобразования измеряемых сигналов в перемещение стрелки или пера относительно шкалы. Классифицируют измерительные приборы по различным признакам.

По метрологическому назначению приборы делят на технические, лабораторные и образцовые.

Технические приборы предназначены для работы в производственных условиях. Поэтому они должны быть недорогими и надежными в эксплуатации. В показания таких приборов не вводят поправки на погрешность измерений. Класс точности большинства технических приборов в пределах 0,25—2,5.

Лабораторные приборы применяют для точных измерений в лабораторных условиях. Для повышения точности измерений в их показания вводят поправки, учитывающие условия измерения (температура в лаборатории, атмосферное давление, влажность и т. п.). Кроме того, лабораторные приборы используют для поверки технических приборов. Класс точности лабораторных приборов 0,05; 0,1; 0,2.

Образцовые приборы служат для поверки технических и лабораторных приборов. Класс точности образцовых приборов 0,005; 0,02; 0,05.

По виду выходного сигнала различают измерительные приборы показывающие, самопишущие и интегрирующие.

У показывающих приборов величина измеряемого параметра указывается отсчетным устройством (например, в виде шкалы со стрелкой). Эти приборы просты по конструкции, однако показывают величину измеряемого параметра только в момент измерения, что не позволяет следить за его изменениями во времени. В большинстве приборов показывающее устройство выполнено в виде неподвижной шкалы и подвижной стрелки. В некоторых приборах, наоборот, шкала движется относительно неподвижного указателя. Такая конструкция позволяет существенно уменьшить фронтальные размеры прибора. Результаты измерений могут быть выведены и на цифровое показывающее устройство. В этом случае на результат отсчета не влияют субъективные особенности оператора.

Самопишущие приборы снабжают устройством для автоматической записи результатов измерений. Запись производится обычно на бумажной дисковой или ленточной диаграмме, движущейся с постоянной скоростью. Это позволяет наблюдать характер изменения параметра во времени. На дисковой диаграмме обычно записывают только один параметр. Ленточная диаграмма допускает поочередную запись нескольких параметров. Такие приборы называются многоточечными и выпускаются на 3, 6 и 12 точек измерения.

В интегрирующих приборах предусмотрено непрерывное суммирование (интегрирование) мгновенных значений из-

Таблица 7. Типы промышленных измерительных приборов

Входной сигнал	Тип измерительного прибора	Входной сигнал	Тип измерительного прибора
Давление сжатого воздуха	ПВ	Электрическое сопротивление	КСМ
Напряжение постоянного тока	КСП	Напряжение переменного тока	КСД
Постоянный ток	КСУ		

меряемого параметра. Для этого они снабжены счетчиком (например, электрическим).

Измерительные приборы часто бывают комбинированными. Например, они могут одновременно показывать и записывать величину измеряемого параметра. Кроме того, измерительные приборы снабжаются дополнительными устройствами для сигнализации, передачи показаний на расстояние, регулирования и др.

В табл. 7 приведены наиболее распространенные типы промышленных измерительных приборов. Каждый тип прибора выпускается в различных модификациях, отличающихся размерами, диапазонами измерения, количеством входных сигналов, наличием вспомогательных устройств и т. д. Например, прибор ПВ10.1Э предназначен для работы с одним из регуляторов системы «Старт». Он показывает и записывает величину регулируемого параметра, показывает величину задания и управляющего воздействия; в прибор входит станция управления регулятором.

Прибор КСП41.343.80.063 предназначен для одновременного измерения трех постоянных напряжений. Он поочередно показывает и записывает входные сигналы, имеет трехпозиционное регулирующее устройство с отдельным заданием на каждую точку. Время прохождения указателем всей шкалы прибора 2,5 с.

Для повышения точности измерений в измерительных приборах используется нулевой метод измерения с автоматическим уравновешиванием. Такие измерительные приборы действуют как автоматические компенсаторы и построены по принципу астатической следящей системы, подобно промежуточным преобразователям, рассмотренным в § 15.

Приборы для измерения давления сжатого воздуха являются вторичными приборами пневматической системы «Старт» и применяются как универсальные для измерения любых технологических параметров, предварительно преобразованных в давление сжатого воздуха.

Принципиальная схема прибора приведена на рис. 42, а. Прибор состоит из сильфона 10, рычага 1, сопла с заслонкой 2, мембраны 4, связанной с рычагом 5, и пружины 9, связанной

с другим концом рычага 5 леской 6. На леске укреплена стрелка показывающего устройства 7.

Структурная схема прибора дана на рис. 42, б. Измерительная цепь состоит из четырех преобразователей. Первый — сильфон 10 — преобразует измеряемое давление  $p$  в силу  $F$ , приложенную к рычагу 1. Второй преобразует эту силу в момент  $M$ . Функцию этого преобразователя выполняет большее плечо рычага  $a$ . Третий преобразует этот момент в перемещение стрелки  $l_1$  и представляет собой следящую систему. Цепь обратной связи этой системы образована пружиной 9 и меньшим плечом рычага  $b$ . Наконец, четвертый преобразователь — показывающее устройство 7 — преобразует перемещение стрелки относительно шкалы в показания прибора  $y$ .

Рассмотрим принцип действия прибора. К плечам рычага 1 приложены две силы: сила  $F$ , развиваемая сильфоном, и сила  $F_M$ , создаваемая пружиной. Эти силы создают на рычаге противоположно направленные моменты  $M$  и  $M_M$ . Результирующий момент  $\Delta M$ , равный их разности, преобразуется в перемещение 1 заслонки относительно сопла. Выходное давление  $p_1$  преобразователя сопло-заслонка 2—3 действует на мембрану 4. Прогиб мембраны вызывает поворот рычага 5. При этом правый конец

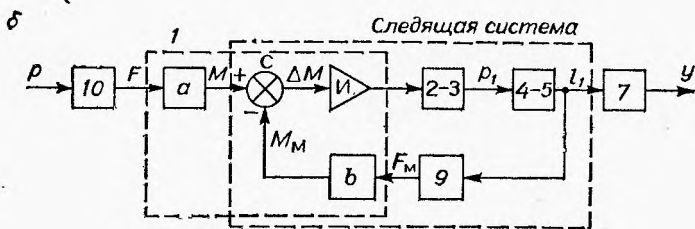
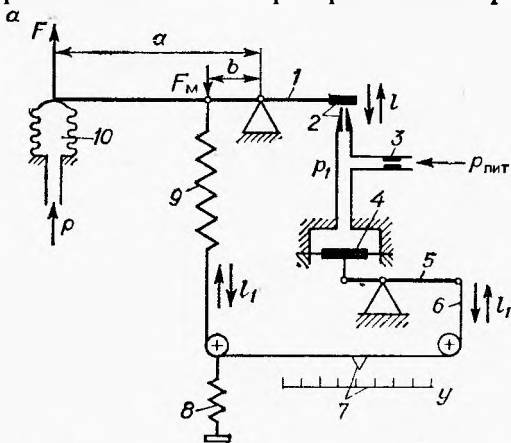


Рис 42. Прибор для измерения давления сжатого воздуха:

а — принципиальная схема; б — структурная схема;  
 1, 5 — рычаги; 2 — сопло с заслонкой; 3 — постоянный дроссель; 4 — мембрана; 6 — леска; 7 — показывающее устройство; 8 — регулировочный винт; 9 — пружина; 10 — сильфон.

рычага тянет леску 6, вызывая тем самым перемещение  $l_1$  нижнего конца пружины 9. Это перемещение является выходным сигналом следящей системы и одновременно входным сигналом цепи обратной связи. Растяжение пружины вызывает силу  $F_m$ , которая через меньшее плечо рычага  $b$  создает на нем момент  $M_m$ , замыкая тем самым контур обратной связи следящей системы.

В прямой цепи этой системы находится интегратор, роль которого выполняет рычаг 1, и поэтому она является астатической. Статическая характеристика астатической системы, как известно, определяется характеристикой преобразователей в цепи обратной связи — пружины 9 с плечом  $b$  рычага. Следовательно, она линейная. Остальные преобразователи измерительной цепи на рис. 42, б имеют также линейные характеристики, поэтому шкала прибора получается равномерной.

Техническое обслуживание прибора заключается в периодической проверке нуля, смене диаграммы и заправке пишущего устройства чернилами. Для настройки нуля (при  $p_0 = 0,2 \cdot 10^5$  Па стрелка прибора должна остановиться на нулевой отметке шкалы) служит винт 8, с помощью которого изменяется начальное натяжение пружины 9.

Промышленность выпускает приборы типа ПВ для одновременного измерения одного, двух и трех пневматических сигналов. Конструкции этих приборов отличаются лишь количеством измерительных устройств, размещенных в одном корпусе.

**Приборы для измерения напряжения постоянного тока.** Для измерения напряжения постоянного тока нулевым методом применяют автоматические потенциометры.

Принципиальная схема автоматического потенциометра приведена на рис. 43, а. Потенциометр состоит из неуравновешенного моста 1, усилителя 4, реверсивного электродвигателя 6 и показывающего устройства 5.

Структурная схема прибора дана на рис. 43, б. Измерительная цепь включает два преобразователя. Первый преобразует измеряемое напряжение  $U$  в поворот вала реверсивного электродвигателя 6 и в перемещение  $l$  механически связанных с ним движка реостата 2 и стрелки показывающего устройства 5. Второй — показывающее устройство 5 — преобразует это перемещение в показания прибора  $y$ .

Рассмотрим принцип действия автоматического потенциометра. Во входную цепь усилителя 4 последовательно с измеряемым напряжением включен неуравновешенный мост 1. Его выходное напряжение  $U_m$  действует встречно с измеряемым напряжением  $U$ , и поэтому к входу усилителя 4 приложена их разность  $\Delta U$ . Эта разность усиливается, и усиленное напряжение  $U_d$  приводит в действие реверсивный электродвигатель 6. Вал электродвигателя перемещает движок реостата 2 и стрелку показывающего устройства 5. Это перемещение  $l$  является одновременно выходным сигналом следящей системы и входным



сигналом преобразователя в цепи обратной связи, функцию которого выполняет неуравновешенный мост 1.

В рассмотренной следящей системе входная цепь усилителя играет роль сумматора  $C$ , а реверсивный электродвигатель является интегратором. Поэтому эта следящая система астатическая. Следовательно, чтобы ее статическая характеристика была линейной, такой же должна быть характеристика неуравновешенного моста 1. Но, как известно (§ 13), у неуравновешенного моста с переменным резистором в одном плече нелинейная характеристика. Здесь же переменный резистор — реостат 2 — включен в два смежных плеча моста, благодаря чему, суммарное сопротивление  $R_1 + R_2$  не изменяется при перемещении движка. Поэтому, как следует из формулы (16), зависимость выходного напряжения моста  $U_m$  от сопротивления  $r$  реостата 2 между движком и нижним его концом будет линейная.

В качестве переменного резистора в этом мосту применен реостат с линейной характеристикой — реохорд. Поэтому статическая характеристика всего моста, как обратного преобразователя перемещения  $l$  в напряжение  $U_m$ , оказывается линейной. Таким образом получается равномерная шкала автоматического потенциометра.

Поскольку выходной сигнал неуравновешенного моста зависит от напряжения источника питания 3, в автоматических потенциометрах используются стабилизированные источники питания.

Промышленность выпускает различные типы автоматических потенциометров, отличающиеся главным образом конструктив-

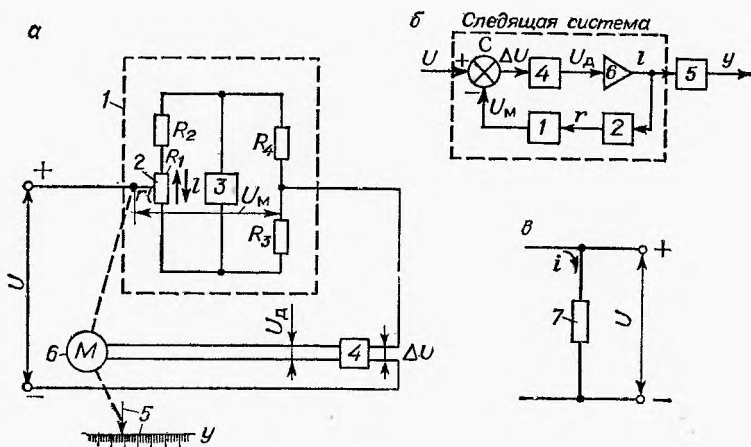


Рис. 48. Автоматический потенциометр:

$a$  — принципиальная схема;  $b$  — структурная схема;  $v$  — входная цепь при измерении постоянного тока; 1 — неуравновешенный мост; 2 — реостат (реохорд); 3 — источник питания стабилизированный; 4 — усилитель; 5 — показывающее устройство; 6 — реверсивный электродвигатель; 7 — постоянный резистор.

ным оформлением (размером, формой шкалы, видом диаграммы и т. п.). Принципиальные же измерительные схемы всех этих приборов одинаковы.

Наибольшее применение получили автоматические потенциометры КСП4. Они производят запись показаний на складывающуюся диаграммную ленту. Блочный принцип построения обеспечивает удобство их эксплуатации и ремонта.

В техническое обслуживание прибора, кроме периодической замены диаграммной ленты и заправки чернилами, входит также регулировка успокоения колебаний стрелки при резком изменении измеряемого напряжения. Для этого служат регуляторы чувствительности и обратной связи, размещенные в усилителе. При правильной настройке стрелка прибора должна успокаиваться после двух-трех колебаний возле положения равновесия.

**Приборы для измерения постоянного тока.** Для измерения постоянного тока нулевым методом применяют автоматические миллиамперметры. Принципиальная и структурная схемы автоматического миллиамперметра полностью совпадают с аналогичными схемами автоматического потенциометра (см. рис. 43, а, б). Входной сигнал  $i$  миллиамперметра преобразуется в  $U$  за счет прохождения измеряемого тока  $i$  по резистору  $R$ , включенному во входную цепь прибора (рис. 43, в).  $U$  миллиамперметров, предназначенных для измерения унифицированного токового сигнала 0—5 мА, сопротивление этого резистора 2 Ом.

Промышленные автоматические миллиамперметры КСУ4 фактически представляют собой автоматические потенциометры КСП4, снабженные входным резистором. Поэтому их конструкция, внешний вид, а также требования к эксплуатации идентичны описанным.

**Приборы для измерения электрического сопротивления.** Для измерения электрического сопротивления наибольшее применение получили автоматические уравновешенные мосты, так как в отличие от неуравновешенных, они производят измерение нулевым методом.

Рассмотрим сначала принцип действия неавтоматического уравновешенного моста, схема которого дана на рис. 44, а. Делитель  $D_1$  этого моста образован двумя переменными резисторами: измеряемым резистором  $R_1$  и реохордом  $R_2$ . Делитель  $D_2$  образован постоянными резисторами  $R_3$  и  $R_4$ .

Наличие в делителе  $D_1$  двух переменных резисторов позволяет получить на его выходе постоянное по величине напряжение  $U_1$  при переменной величине сопротивления резистора  $R_1$ . Это достигается перемещением движка реохорда  $R_2$ , например, увеличением сопротивления  $r$  между движком и верхним концом реохорда при увеличении сопротивления резистора  $R_1$  и наоборот. Такой операцией при любой величине входного сигнала  $R_1$  может быть достигнуто состояние равновесия моста, при

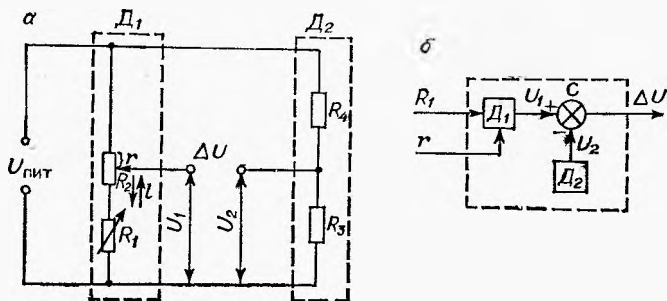


Рис. 44. Уравновешенный мост:

а — принципиальная схема; б — структурная схема;  $D_1$  и  $D_2$  — делители; С — сумматор;

котором  $U_1 = U_2$  и  $\Delta U = 0$ . Следовательно, с помощью уравновешенного моста реализуется нулевой метод измерения сопротивления.

Структурная схема уравновешенного моста приведена на рис. 44, б. Она отличается от структурной схемы неуравновешенного моста (см. рис. 23, б) наличием двух входных сигналов: измеряемого —  $R_1$  — и компенсирующего —  $r$ . Здесь  $r$  является переменной мерой при измерении сопротивления резистора и по ее величине судят о величине  $R_1$ .

Рассмотрим автоматический уравновешенный мост. Его принципиальная схема приведена на рис. 45, а, а структурная схема — на рис. 45, б. Он состоит из собственно уравновешенного моста 1 с включенным в него реохордом  $R_2$ , усилителя 4 и реверсивного электродвигателя 2. Реверсивный электродвигатель кинематически связан с движком реохорда и стрелкой показывающего устройства 3.

Как видно из структурной схемы, автоматический уравновешенный мост представляет собой следящую систему, причем

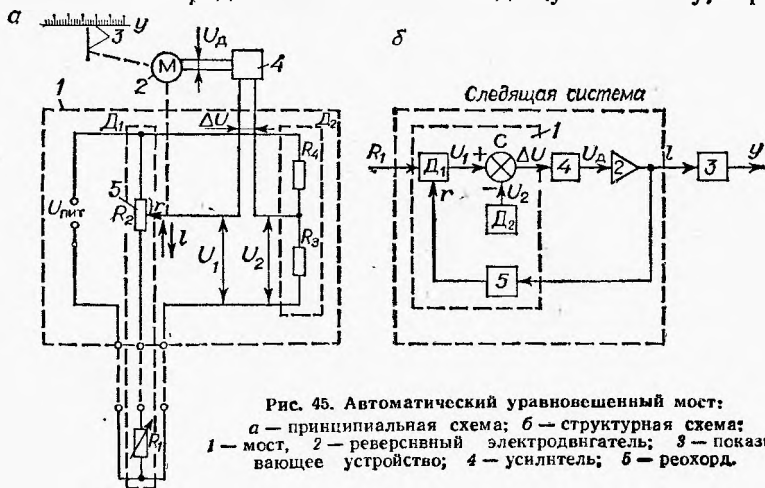


Рис. 45. Автоматический уравновешенный мост:

а — принципиальная схема; б — структурная схема; 1 — мост, 2 — реверсивный электродвигатель; 3 — показывающее устройство; 4 — усилитель; б — реохорд.

Рис. 46 Прибор для измерения напряжения переменного тока: а — принципиальная схема; б — структурная схема; 1 и 8 — дифференциально-трансформаторные преобразователи; 2 — уравновешенный мост; 3 — измерительный прибор; 4 — усилитель; 5 — показывающее устройство; 6 — реверсивный электродвигатель; 7 — лекало.

наличие интегратора в виде реверсивного электродвигателя 2 делает ее астатической. Мост 1 в этой системе выполняет те же функции, что и уравновешенный мост на рис. 44, б. Выходное напряжение моста  $\Delta U$  усиливается усилителем 4 и подается на реверсивный электродвигатель 2. Вал электродвигателя перемещает одновременно движок реохорда 5 и стрелку показывающего устройства 3, которое преобразует это перемещение в показания прибора  $y$ .

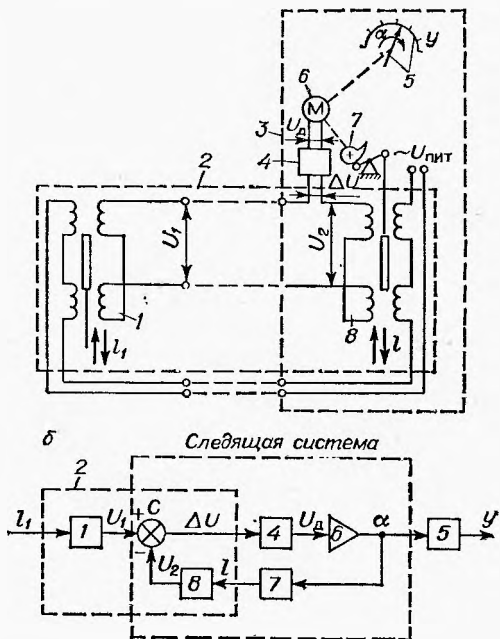
В цепь обратной связи следящей системы включен реохорд  $R_2$ , имеющий линейную характеристику. Следовательно, статическая характеристика следящей системы также линейная, а шкала автоматического уравновешенного моста равномерная.

В промышленных автоматических мостах КСМ применяют приведенную на рис. 45, а трехпроводную схему соединения прибора с измеряемым резистором  $R_1$ . Такая схема позволяет уменьшить влияние сопротивления соединительных проводов на показания прибора.

Промышленные автоматические уравновешенные мосты КСМ4 по конструкции аналогичны потенциометрам КСП4 и миллиамперметрам КСУ4. Техническое обслуживание этих приборов также одинаковое.

**Приборы для измерения напряжения переменного тока.** Приборы для измерения напряжения переменного тока нулевым методом работают в комплекте с дифференциально-трансформаторными или ферродинамическими преобразователями. Поэтому фактически входным сигналом для них является перемещение плунжера или поворот рамки трансформаторного преобразователя.

На рис. 46, а показана принципиальная схема прибора КСД в комплекте с дифференциально-трансформаторным преобразователем 1. Прибор 3 состоит из дифференциально-трансформа-



торного преобразователя 8, усилителя 4, реверсивного электродвигателя 6 и механически связанных с ним лекала 7 и стрелки показывающего устройства 5.

Вторичные обмотки дифференциально-трансформаторных преобразователей 1 и 8 образуют уравновешенный мост переменного тока 2, выходное напряжение которого  $\Delta U$  усиливается усилителем 4. В отличие от рассмотренных мостовых схем на резисторах, здесь напряжение на каждом плече создается за счет индуктивной связи с первичной обмоткой. Поэтому электрическая схема такого моста отличается от схемы резисторного моста. Структурные же схемы этих уравновешенных мостов одинаковы.

Из структурной схемы прибора (рис. 46, б) видно, что измерительная цепь его состоит из трех последовательно включенных преобразователей. Первый преобразует перемещение плунжера  $l_1$  в напряжение переменного тока  $U_1$ ; он является частью уравновешенного моста 2. Второй преобразует это напряжение в угол поворота  $\alpha$  лекала 7 и стрелки показывающего устройства 5. Этот преобразователь представляет собой астатическую следящую систему. Третьим преобразователем является показывающее устройство прибора 5.

Рассмотрим принцип действия прибора. В мосту 2 производится сравнение измеряемого напряжения  $U_1$  дифференциально-трансформаторного преобразователя 1 с напряжением  $U_2$  дифференциально-трансформаторного преобразователя 8. Их разность  $\Delta U$  усиливается усилителем 4, и усиленное напряжение  $U_d$  приводит в действие реверсивный электродвигатель 6. Вал электродвигателя поворачивает лекало 7 и стрелку показывающего устройства 5. Угол поворота лекала  $\alpha$  рычагом преобразуется в линейное перемещение  $l$  плунжера дифференциально-трансформаторного преобразователя 8 и затем в напряжение  $U_2$ .

Статическая характеристика измерительной цепи определяется характеристиками дифференциально-трансформаторного преобразователя 1 и преобразователей в цепи обратной связи следящей системы — лекала 7 и дифференциально-трансформаторного преобразователя 8.

Характеристики дифференциально-трансформаторных преобразователей согласно формуле (19) линейны. Лекало играет такую же роль, как блок линеаризации в промежуточных преобразователях НП-ТЛ1-М, НП-СЛ1-М и НП-ПЗ. Его характеристику подбирают так, чтобы обеспечить линейную зависимость выходного сигнала прибора от измеряемого параметра, т. е. скомпенсировать нелинейность измерительной цепи, предшествующей прибору. Характеристика лекала определяется его профилем, что позволяет легко получить любой требуемый вид зависимости. Обычно изготавливают лекала двух видов: с квадратичной характеристикой для измерения расхода и с линейной для измерения уровня, давления и т. д.

Вторичные обмотки дифференциально-трансформаторного преобразователя 8 шунтированы потенциометром настройки диапазона измерения прибора. Для настройки нуля прибора последовательно со вторичной обмоткой преобразователя 8 включена дополнительная обмотка, также шунтированная подгоночным потенциометром (потенциометры настройки диапазона измерения и дополнительная обмотка на рис. 46, а не показаны).

Контроль исправности прибора в процессе его эксплуатации сводится к проверке нулевой и контрольной точек. Ноль прибора проверяют при нулевом значении параметра на входе первичного преобразователя и настраивают потенциометром «Ноль».

При нажатии кнопки «Контроль» стрелка прибора должна остановиться против контрольной отметки шкалы. Положение стрелки изменяют перемещением резьбового плунжера дифференциально-трансформаторного преобразователя 8.

Техническое обслуживание прибора сводится к ежедневной замене диаграммного диска, периодической заправке чернилами и регулировке колебания стрелки, как в описанных ранее приборах.

### Контрольные вопросы

1. Почему в приборе для измерения давления сжатого воздуха не применен усилитель мощности?
2. Как нужно изменить винтом 8 (рис. 42) натяжение пружины 9 (увеличить или уменьшить), если стрелка прибора при  $p_0 = 0,2 \cdot 10^5$  Па показывает величину больше нуля?
3. Каково назначение дросселя 3 в приборе для измерения давления сжатого воздуха (рис. 42)?
4. Как повлияет на показания прибора для измерения давления сжатого воздуха нестабильность давления питания?
5. Почему питание мостовой схемы автоматического потенциометра производится от стабилизированного источника?
6. Почему для автоматического уравновешенного моста не требуется стабилизировать напряжение питания?
7. Что покажет автоматический потенциометр, если при подключении измеряемого напряжения изменена его полярность?
8. Что покажет прибор для измерения напряжения переменного тока, если поменять местами концы первичной обмотки дифференциально-трансформаторного преобразователя 1 (рис. 46)? концы вторичной обмотки?
9. Протекает ли ток во входной цепи автоматического потенциометра в момент его уравновешивания?
10. Влияет ли на погрешность измерения автоматического потенциометра расстояние между ним и источником измеряемого напряжения?
11. Питание мостовых схем в автоматическом уравновешенном мосту и приборе для измерения напряжения переменного тока производится переменным током. Какую из этих мостовых схем можно питать постоянным током?
12. Из-за чего могут возникать непрерывные колебания стрелки возле положения равновесия у автоматических электрических измерительных приборов? (Для этого рассмотрите эти приборы как астатические следящие системы). Чем устраняются эти колебания?
13. Влияет ли профиль лекала в приборе для измерения напряжения переменного тока на статическую характеристику прибора?

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Измерение любого технологического параметра начинается с его преобразования датчиком в механический или электрический промежуточный сигнал. Затем эти сигналы поступают в промежуточные преобразователи и измерительные приборы (см. гл. IV). Эта глава посвящена только преобразованию измеряемых технологических параметров датчиками в промежуточные сигналы.

По сравнению с другими элементами измерительной цепи датчики наиболее многочисленны и, несмотря на простоту устройства, сложны в эксплуатации.

Многообразие датчиков объясняется различием условий, в которых приходится производить измерение технологических параметров. Например, может потребоваться измерять уровень в аппарате с низким или высоким давлением, при сильной или слабой агрессивности среды, в помещении, где могут накапливаться пары взрывоопасного вещества, или на открытом воздухе и т. п. Для этих случаев необходимы различные датчики, хотя все они будут измерять один и тот же параметр.

Сложность эксплуатации датчиков связана с тем, что под влиянием условий работы может происходить изменение их коэффициента передачи, например, за счет зарастания (в суспензиях), износа (в абразивных средах), необратимых деформаций (при повышении давления или температуры в аварийных ситуациях) и т. п. При неизменных коэффициентах передачи последующих преобразователей — промежуточных и измерительного прибора — это приведет к изменению коэффициента передачи всей измерительной цепи, и измерение параметра будет вестись с погрешностью, превышающей допустимую. Если оператор об этом не знает и считает показания прибора правильными, то нормальный режим протекания технологического процесса может нарушиться.

Контроль коэффициента передачи датчиков часто связан со значительными трудностями, так как их поверка, во-первых, в большинстве случаев проводится экспериментальным путем, а; во-вторых, на средах-имитаторах, например, на воде вместо кислоты или на воздухе вместо аммиака.

Для одних датчиков (температуры, давления) найденный таким образом коэффициент передачи не изменяется при переходе на рабочую среду, для других (уровня) возможен пересчет коэффициента передачи, например, по плотности рабочей среды. Однако имеется много датчиков, требующих определения коэффициента передачи непосредственно на рабочих средах. К их числу относятся датчики некоторых расходомеров и большинство датчиков приборов для измерения состава и свойств веществ, таких, как кондуктометры, газоанализаторы, хроматографы и т. д.

## § 17. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Измерение давления необходимо для управления технологическими процессами и обеспечения безопасности производства. Кроме того, этот параметр используется при косвенных измерениях других технологических параметров: уровня, расхода, температуры, плотности и т. д. В системе СИ за единицу давления принят паскаль (Па).

Обычно измеряют *избыточное давление*  $p_{\text{изб}}$ . При этом за нуль (начало отсчета) принимают *атмосферное давление*  $p_{\text{атм}}$ . Сумма атмосферного и избыточного давлений представляет собой *абсолютное давление*, т. е.

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}} \quad (35)$$

Если абсолютное давление меньше атмосферного, то их разность называется *разрежением* или *вакуумом*:

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{абс}} \quad (36)$$

В большинстве случаев первичные преобразователи давления имеют неэлектрический выходной сигнал в виде силы или перемещения и объединены в один блок с измерительным прибором. Если результаты измерений необходимо передавать на расстояние, то применяют промежуточное преобразование этого неэлектрического сигнала в унифицированный электрический или пневматический. При этом первичный и промежуточный преобразователи объединяют в один измерительный преобразователь.

В зависимости от вида и величины измеряемого давления приборы для измерения давления условно делят на:

**манометры** — для измерения избыточного давления в широком диапазоне;

**напорометры** — для измерения избыточного давления до  $0,4 \cdot 10^5$  Па;

**вакуумметры** — для измерения глубокого разрежения;

**тягомеры** — для измерения разрежения до  $0,4 \cdot 10^5$  Па;

**тягонапорометры** — для измерения избыточного давления до  $0,4 \cdot 10^5$  Па и разрежения до  $0,4 \cdot 10^5$  Па;

**дифференциальные манометры (дифманометры)** — для измерения разности (перепада) давлений.

В большинстве приборов измеряемое давление преобразуется в деформацию упругих элементов, поэтому они называются деформационными.

**Деформационные приборы** широко применяют для измерения давления при ведении технологических процессов благодаря простоте устройства, удобству и безопасности в работе. Все деформационные приборы имеют в схеме какой-либо упругий элемент, который деформируется под действием измеряемого давления: трубчатую пружину, мембрану или сильфон.

Наибольшее применение получили приборы с трубчатой пружинной. Их выпускают в виде показывающих



манометров и вакуумметров с максимальным пределом измерений до  $10\,000 \cdot 10^5$  Па. В таких приборах (рис. 47) с изменением измеряемого давления  $p$  трубчатая пружина 1 изменяет свою кривизну. Ее свободный конец через тягу 2 поворачивает зубчатый сектор 3 и находящуюся с ним в зацеплении шестерню 4. Вместе с шестерней поворачивается закрепленная на ней стрелка 5, перемещающаяся вдоль шкалы 6. Для дистанционной передачи показаний выпускают манометры с промежуточными преобразователями с токовым и пневматическим выходом (МП-Э, МП-П), а также с дифференциально-трансформаторными преобразователями (МЭД).

Из мембранных приборов широко используют бесшкальные дифманометры ДМ (рис. 48), снабженные дифференциально-трансформаторным преобразователем перемещения в унифицированный сигнал напряжения переменного тока.

Упругим чувствительным элементом такого дифманометра является мембранный блок, состоящий из двух сообщающихся мембранных коробок 1 и 2, заполненных жидкостью. Перепад давлений в камерах дифманометра вызывает деформацию мембранных коробок. При этом сжатие нижней мембранной коробки больше и жидкость вытесняется из нее в верхнюю мембранную коробку, вызывая тем самым ее расширение. Перемещение верхней мембраны передается жестко связанному с ней плунжеру дифференциально-трансформаторного преобразователя 3.

Дифманометр снабжен вентилями «+», «-» и «0». Через вентиль «+» к дифманометру подводится большее давление, а через вентиль «-» — меньшее. При работе дифманометра оба эти вентиля открыты, а вентиль «0» закрыт. Если вентиля «+» и «-» закрыть, а уравнительный вентиль «0» открыть, то

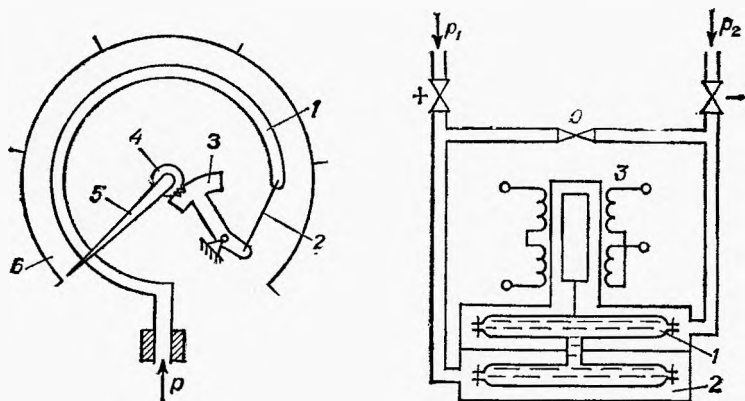


Рис. 47. Манометр с трубчатой пружиной:

1 — трубчатая пружина; 2 — тяга; 3 — зубчатый сектор; 4 — шестерня; 5 — стрелка; 6 — шкала.

Рис. 48. Мембранный дифманометр:

1 и 2 — мембранные коробки; 3 — дифференциально-трансформаторный преобразователь.

давления в камерах дифманометра станут одинаковыми. При этом стрелка измерительного прибора КСД должна установиться на делении, соответствующем нулевому перепаду давлений.

Дифманометры ДМ изготавливают для измерения перепада давлений до  $6,3 \cdot 10^5$  Па при статическом давлении до  $630 \cdot 10^5$  Па.

Промышленность выпускает также мембранные дифманометры с промежуточными преобразователями, имеющими унифицированные токовые или пневматические сигналы (например, ДМ-Э и ДМ-П).

Для преобразования деформации мембраны в унифицированный токовый сигнал применяют также тензорезисторные промежуточные преобразователи, в которых сопротивление резистора изменяется при его растяжении или сжатии. В таких приборах (рис. 49, а) тензорезистор 1 укреплен на жесткой измерительной мембране 2. Деформация мембраны, пропорциональная приложенному давлению  $p$ , приводит к деформации тензорезистора и изменению его сопротивления. Это сопротивление преобразуется измерительной схемой 3, включающей неуравновешенный мост, в выходной сигнал постоянного тока  $i$ . Так как деформация жесткой мембраны мала, то применяют полупроводниковые кремниевые тензорезисторы, обладающие высокой чувствительностью.

В дифманометрах (рис. 49, б) чувствительным элементом служит блок из двух неупругих мембран 4 и 5, соединенных между собой штоком 6. Смещение этого штока под действием перепада давлений приводит к изгибу рычага 7 и деформации измерительной мембраны 2. Мембраны 4 и 5 выполнены из коррозионно-стойкого материала, что позволяет использовать дифманометр для измерений в сильноагрессивных средах.

Для измерения давления агрессивных сред применяют датчики, снабженные защитной мембраной 4, изготовленной, как и в дифманометрах, из коррозионно-стойкого материала (рис. 49, в). Измеряемое давление  $p$  передается к измерительной

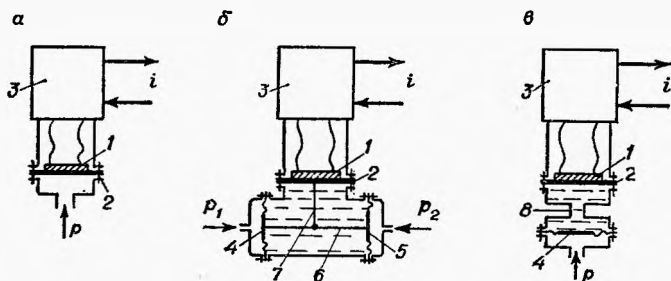


Рис. 49. Тензорезисторные приборы:

а — манометр для неагрессивных сред; б — дифманометр; в — манометр для агрессивных сред; 1 — тензорезистор; 2 — измерительная мембрана; 3 — промежуточный преобразователь сопротивления тензорезистора в ток; 4, 5 — коррозионно-стойкие мембраны; 6 — шток; 7 — рычаг; 8 — внутренняя полость датчика.

мембране 2 через силиконовое масло, которым заполнена внутренняя полость датчика 8.

Промышленные тензорезисторные преобразователи типа «Сапфир» предназначены для преобразования давления до 100 МПа, разрежения и разности давлений до 16 МПа в пропорциональное значение выходного сигнала — постоянного тока.

**Особенности эксплуатации приборов для измерения давления.** При эксплуатации приборов, измеряющих давление, часто требуется защита их от агрессивного и теплового воздействия среды.

Если среда химически активна по отношению к материалу прибора, то его защиту производят с помощью разделительных сосудов или мембранных разделителей.

Разделительный сосуд (рис. 50, а) заполняется жидкостью, инертной по отношению к материалу прибора, соединительных трубок и самого сосуда. Кроме того, разделительная жидкость не должна химически взаимодействовать с измеряемой средой или смешиваться с ней. В качестве разделительных жидкостей применяют водные растворы глицерина, этиленгликоль, технические масла и др.

В мембранном разделителе (рис. 50, б) измеряемая среда отделяется от прибора мембраной с малой жесткостью из нержавеющей стали или фторопласта. Для передачи давления от мембраны к прибору полость между ними заполняют жидкостью.

Для предохранения прибора от действия высокой температуры среды применяют сифонные трубки (рис. 50, в).

Деформационные приборы требуют периодической поверки. В эксплуатационных условиях у них проверяют нулевую и рабочую точки шкалы. Для этого применяют трехходовые краны (рис. 51). При поверке нулевой точки прибор соединяют с атмосферой (положение в). Стрелка прибора должна вернуться к нулевой отметке. Поверку прибора в рабочей точке шкалы (положение б) осуществляют по контрольному манометру, укрепляемому на боковом фланце. При пользовании краном

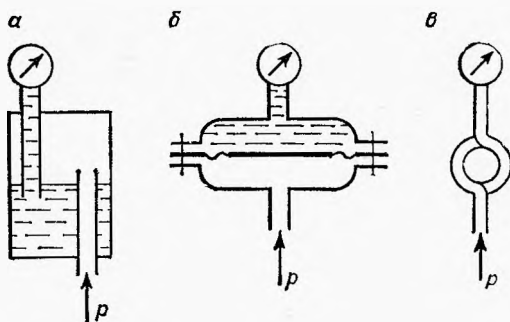


Рис. 50. Защитные устройства:

а — разделительный сосуд; б — мембранный разделитель; в — сифонная трубка.

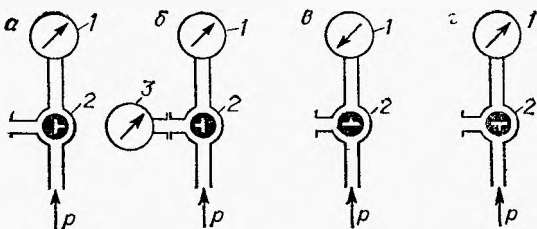


Рис. 51. Проверка манометров с помощью трехходового крана:

*а* — измерение; *б* — проверка в рабочей точке шкалы; *в* — проверка нуля; *г* — продувка соединительной линии:

1 — манометр; 2 — трехходовой кран; 3 — контрольный манометр.

необходимо строго соблюдать плавность включения и выключения прибора.

С помощью трехходового крана можно проводить также продувку соединительной линии (положение *г*).

### Контрольные вопросы

1. Чему равна величина абсолютного вакуума в паскалях?
2. Можно ли дифманометром измерять давление? разрежение?
3. Почему в мембранном разделителе нельзя применять жесткую мембрану?
4. Выйдет ли из строя мембранный блок дифманометра ДМ (рис. 48), если перепад давлений на нем превысит верхний предел измерений?
5. Что должен показывать манометр с трехходовым краном при проверке нуля? при продувке соединительной линии?
6. Из каких измерительных преобразователей можно составить измерительную цепь для передачи результатов измерения давления на щит оператора при нормальных условиях производства? в условиях взрывоопасного производства?

### § 18. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

Для ведения технологических процессов большое значение имеет контроль за уровнем жидкостей и твердых сыпучих материалов в производственных аппаратах. Кроме того, зная площадь любой емкости, по величине уровня можно определить количество вещества в ней. Часто по условиям технологического процесса нет необходимости в измерении уровня по всей высоте аппарата. В таких случаях применяют узкопредельные, но более точные уровнемеры. Особую группу составляют уровнемеры, используемые только для сигнализации предельных значений уровня.

Для измерения уровня жидкости применяют поплавковые, буйковые, гидростатические, ультразвуковые и акустические приборы, для измерения уровня жидкости и твердых сыпучих материалов — емкостные и радиоизотопные.

**Поплавковые уровнемеры.** В поплавковых уровнемерах имеется плавающий на поверхности жидкости поплавок, в результате чего измеряемый уровень преобразуется в перемещение поплавка. В таких приборах используется легкий поплавок, изготовленный из коррозионно-стойкого материала.

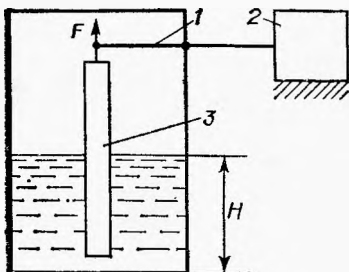


Рис. 52 Буйковый уровнемер:  
1 — рычаг; 2 — промежуточный преобразователь силы в унифицированный сигнал; 3 — буюк.

Показывающее устройство прибора соединено с поплавком тросом или с помощью рычагов. Поплавковыми уровнемерами можно измерять уровень жидкости в открытых емкостях.

**Буйковые уровнемеры.** В буйковых уровнемерах (рис. 52) применяется неподвижный погруженный в жидкость буюк 3. Принцип действия буйковых уровнемеров основан на том, что на погруженный буюк действует со стороны жидкости выталкивающая сила  $F$ . По закону Архимеда эта сила равна весу жидкости, вытесненной буюком. Но, как видно из рис. 52, количество вытесненной жидкости зависит от глубины погружения буйка, т. е. от уровня в емкости  $H$ . Таким образом, в буйковых уровнемерах измеряемый уровень  $H$  преобразуется в пропорциональную ему выталкивающую силу. Поэтому зависимость выталкивающей силы от измеряемого уровня линейная.

В буйковых уровнемерах УБ-П и УБ-Э буюк передает усилие на рычаг 1 промежуточного преобразователя 2. Выходной сигнал первого уровнемера — унифицированный пневматический, второго — унифицированный электрический сигнал (постоянный ток).

Принцип действия буйковых уровнемеров позволяет в широких пределах изменять их диапазон измерения. Это достигается как заменой буйка, так и изменением передаточного отношения рычажного механизма промежуточного преобразователя. Уровнемеры УБ могут измерять уровень в пределах от 0—40 мм до 0—16 м.

**Гидростатические уровнемеры.** Гидростатический способ измерения уровня основан на том, что в жидкости существует гидростатическое давление, пропорциональное глубине, т. е. расстоянию от поверхности жидкости. Поэтому для измерения уровня гидростатическим способом могут быть использованы приборы для измерения давления или перепада давлений. В качестве таких приборов обычно применяют дифманометры.

При включении дифманометра 1 по схеме, показанной на рис. 53, а, перепад давлений на нем будет равен гидростатическому давлению жидкости, которое пропорционально измеряемому уровню  $H$ .

Если жидкость в емкости находится под избыточным давлением, то дифманометр 1 включают по схеме, приведенной на рис. 53, б, причем его плюсовую камеру соединяют с пространством над жидкостью через уравнивательный сосуд 2. Этот сосуд заполняют жидкостью, столб которой создает постоянное гидростатическое давление в плюсовой камере дифманометра. По-

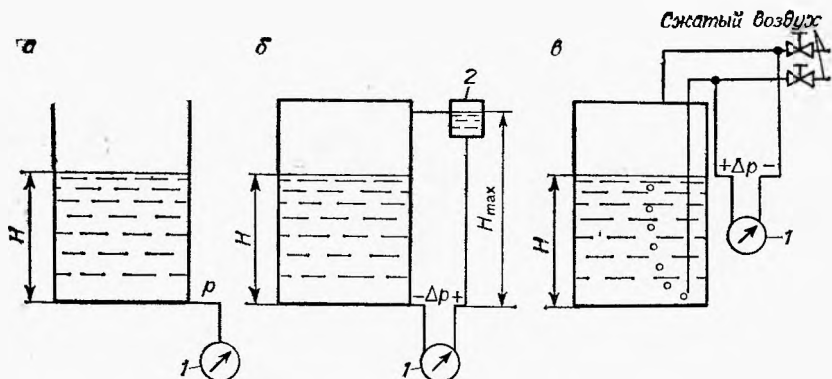


Рис. 53. Измерения уровня дифманометрами:

$a$  — в открытой емкости;  $б$  — в емкости под давлением;  $в$  — для суспензий и шламов;  
 1 — дифманометр; 2 — уравнильный сосуд.

этому измеряемый перепад давлений, равный разности гидростатических давлений жидкости в камерах дифманометра, будет пропорционален разности между уровнем в разделительном сосуде  $H_{max}$  и измеряемым уровнем  $H$ . Так как уровень в разделительном сосуде постоянен и известен, то его всегда можно учесть в показаниях прибора.

При измерении уровня агрессивных жидкостей дифманометр защищается разделительными сосудами или мембранными разделителями, что позволяет заполнить его камеры и трубки неагрессивной жидкостью.

При измерении уровня суспензий и шламов, осадки которых могут забивать импульсные трубки дифманометров, их непрерывно продувают сжатым воздухом. В этом случае дифманометр 1 включают по схеме, приведенной на рис. 53, в. Импульсные трубки все время заполнены продуваемым воздухом. При небольшом расходе воздуха его давление в минусовой камере оказывается равным давлению над жидкостью в емкости, а в плюсовой — давлению в жидкости. Поэтому перепад давлений в дифманометре будет равен гидростатическому давлению жидкости и, следовательно, пропорционален измеряемому уровню.

**Емкостные уровнемеры.** Работа таких уровнемеров основана на различии диэлектрической проницаемости жидкостей и воздуха. Простейший первичный преобразователь емкостного прибора представляет собой электрод 1 (металлический стержень или провод), расположенный в вертикальной металлической трубке 2 (рис. 54, а). Стержень вместе с трубкой образуют конденсатор. Емкость такого конденсатора зависит от уровня жидкости, так как при его изменении от нуля до максимума диэлектрическая проницаемость будет изменяться от диэлектрической проницаемости воздуха до диэлектрической проницаемости жидкости.

Электрическая схема емкостного уровнемера приведена на рис. 54, б. Измерение электрической емкости первичного преобразователя  $C_x$  производится неуравновешенным мостом переменного тока, плечами которого являются индуктивности  $L_1$  и  $L_2$ , емкость  $C_1$  и емкость первичного преобразователя  $C_x$ . При изменении уровня изменяется емкость  $C_x$ , что приводит к изменению выходного напряжения моста  $U$ .

Емкостные уровнемеры могут измерять уровень не только жидкостей, но и твердых сыпучих материалов: цемента, извести и т. п.

Большое распространение получили емкостные сигнализаторы уровня. Для повышения чувствительности их электроды устанавливают в горизонтальном положении. В этом случае погрешность измерения не превышает 3 мм.

**Радиоизотопные уровнемеры.** Такие уровнемеры применяют для измерения уровня жидкостей и сыпучих материалов в закрытых емкостях. Их действие основано на поглощении  $\gamma$ -лучей при прохождении через слой вещества.

В радиоизотопном уровнемере (рис. 55) источник 2 и приемник 10 излучения подвешены на стальных лентах 3, на которых они могут перемещаться в трубах 11 по всей высоте бака 1. Ленты намотаны на барабан 5, приводимый в движение реверсивным электродвигателем 7.

Если измерительная система (источник и приемник  $\gamma$ -лучей) расположена выше уровня измеряемой среды, поглощение излучения слабое и от приемника 10 по кабелю 9 на блок управления 8 будет приходиться сильный сигнал. По этому сигналу электродвигатель 7 получит команду на спуск измерительной системы. При снижении ее ниже уровня среды поглощение  $\gamma$ -лучей резко увеличится, сигнал на выходе приемника уменьшится и электродвигатель начнет поднимать измерительную систему.

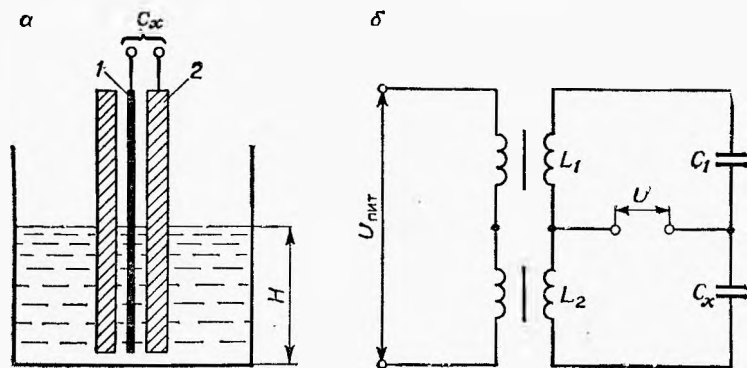


Рис. 54. Емкостный уровнемер:

а — устройство датчика; б — электрическая схема уровнемера;  
1 — электрод; 2 — труба.

Таким образом, положение измерительной системы будет отслеживать уровень в емкости (точнее, она будет находиться в непрерывном колебании около измеряемого уровня). Это положение в виде угла поворота ролика 4 преобразуется измерительным устройством 6 в унифицированный сигнал — напряжение постоянного тока  $U$ .

Радиоизотопные уровнемеры типа УР-8 могут измерять уровень в емкостях высотой до 10 м.

Аналогичный принцип использован в радиоизотопном сигнализаторе уровня ГР-8, источник и приемник излучения которого укрепляют снаружи емкости на необходимой высоте. При достижении измеряемой средой этого уровня включается сигнальное устройство.

**Ультразвуковые и акустические уровнемеры.** Действие уровнемеров этого типа основано на измерении времени прохождения импульса ультразвука от излучателя до поверхности жидкости и обратно. При приеме отраженного импульса излучатель становится датчиком. Если излучатель 1 (рис. 56) расположен над жидкостью, уровнемер называется акустическим; если внутри жидкости — ультразвуковым. В первом случае измеряемое время будет тем больше, чем ниже уровень жидкости  $H$ , во втором — наоборот.

Электронный блок 2 служит для формирования излучаемых ультразвуковых импульсов, усиления отраженных импульсов, измерения времени прохождения импульсом двойного пути (в воздухе или жидкости) и преобразования этого времени в унифицированный электрический сигнал. Например, акустический уровнемер ЭХО-1 используется для измерения уровня неоднородных (с переменной по высоте плотностью),

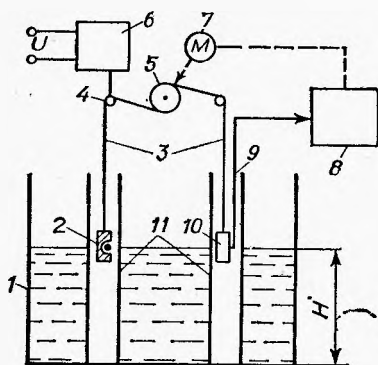


Рис. 55. Радиоизотопный уровнемер:

1 — бак; 2 — источник излучения; 3 — стальные ленты; 4 — ролик; 5 — барабан; 6 — измерительное устройство; 7 — реверсивный электродвигатель; 8 — блок управления; 9 — кабель; 10 — приемник излучения; 11 — трубы.

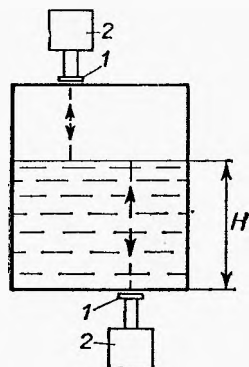


Рис. 56. Ультразвуковой и акустический уровнемеры:

1 — излучатель; 2 — электронный блок.



кристаллизующихся и выпадающих в осадок жидкостей в баках высотой до 3 м и имеет выходной сигнал в виде постоянного тока.

### Контрольные вопросы

1. Повлияет ли избыточное давление в емкости на показания буйкового уровнемера? емкостного уровнемера?
2. Какие свойства измеряемой жидкости оказывают влияние на результат измерения поплавкового уровнемера? буйкового уровнемера? гидростатического уровнемера? емкостного уровнемера? радиоизотопного уровнемера?
3. Чем ограничен диапазон измерения буйкового уровнемера?
4. В какую сторону изменится перепад давлений на дифманометре при увеличении уровня на рис. 53, б и 53, в?
5. Для чего подают сжатый воздух в импульсные трубки при измерении уровня гидростатическим уровнемером? Можно ли заменить сжатый воздух другим газом, например, азотом?
6. В каких случаях приходится применять бесконтактные уровнемеры?
7. Из каких измерительных преобразователей можно составить измерительную цепь для передачи результатов измерения уровня на щит оператора при нормальных условиях производства? во взрывоопасном производстве?

### § 19. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА

Для контроля и управления химическим производством большое значение имеет измерение расхода и количества различных веществ: газов, жидкостей, пульп и суспензий. Расход вещества — это его количество, протекающее через сечение трубопровода в единицу времени. Количество измеряют в единицах объема ( $m^3$ ,  $cm^3$ ) или массы (т, кг, г). Соответственно может измеряться объемный ( $m^3/c$ ,  $m^3/ч$ ,  $cm^3/c$ ) или массовый (кг/с, кг/ч, г/с) расход.

Для измерения расхода веществ применяют расходомеры, основанные на различных принципах действия: расходомеры переменного и постоянного перепада давлений, переменного уровня, электромагнитные, ультразвуковые, вихревые, тепловые и турбинные. Расход сыпучих веществ обычно измеряют различными весоизмерительными устройствами.

Для измерения количества вещества применяют расходомеры с интеграторами или счетчики. Интегратор непрерывно суммирует показания прибора, а количество вещества определяют по разности его показаний за требуемый промежуток времени.

Измерение расхода и количества является сложной задачей, поскольку на показания приборов влияют физические свойства измеряемых потоков: плотность, вязкость, соотношение фаз в потоке и т. п. Физические свойства измеряемых потоков, в свою очередь, зависят от условий эксплуатации, главным образом от температуры и давления.

Если условия эксплуатации расходомера отличаются от условий, при которых производилась его градуировка, то ошибка в показаниях прибора может значительно превысить допустимое значение. Поэтому для серийно выпускаемых приборов

установлены ограничения области их применения: по свойствам измеряемого потока, максимальной температуре и давлению, содержанию твердых частиц или газов в жидкости и т. п.

**Расходомеры переменного перепада давлений.** Действие этих расходомеров основано на возникновении перепада давлений на сужающем устройстве в трубопроводе при движении через него потока жидкости или газа. При изменении расхода  $Q$  величина этого перепада давлений  $\Delta p$  также изменяется.

Для некоторых сужающих устройств как преобразователей расхода в перепад давлений коэффициент передачи определен экспериментально и его значения сведены в специальные таблицы. Такие сужающие устройства называются стандартными (рис. 57).

Наиболее простым и распространенным сужающим устройством является диафрагма (рис. 57, а). Стандартная диафрагма представляет собой тонкий диск с круглым отверстием в центре. От стойкости диафрагмы и особенно входной кромки отверстия существенно зависит ее коэффициент передачи. Поэтому диафрагмы изготовляют из материалов, химически стойких к измеряемой среде и устойчивых против механического износа. Кроме диафрагмы в качестве стандартных сужающих устройств применяют также сопло Вентури (рис. 57, б), трубу Вентури (рис. 57, в), которые создают меньшее гидравлическое сопротивление в трубопроводе.

Сужающее устройство расходомера переменного перепада давлений является первичным преобразователем, в котором расход преобразуется в перепад давлений.

Промежуточными преобразователями для расходомеров переменного перепада давлений служат дифманометры. Дифманометры связаны с сужающим устройством импульсными трубками и устанавливаются в непосредственной близости от него. Поэтому в расходомерах переменного перепада давлений обычно используют дифманометры, снабженные промежуточным преобразователем для передачи результатов измерений на щит оператора (например, мембранные дифманометры ДМ).

Так же как при измерении давления и уровня, для защиты дифманометров от агрессивного воздействия измеряемой среды применяют разделительные сосуды и мембранные разделители.

Особенностью первичных преобразователей расходомеров переменного перепада давлений является квадратичная зависимость перепада давлений от величины расхода. Чтобы

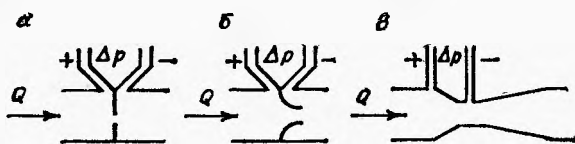
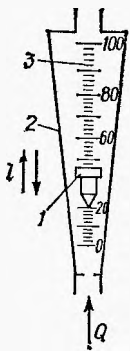


Рис. 57. Стандартные сужающие устройства:

а — диафрагма; б — сопло Вентури; в — труба Вентури.

Рис. 58. Ротаметр:

1 — поплавок; 2 — конусная трубка; 3 — шкала.



показания измерительного прибора расходомера линейно зависели от расхода, в измерительную цепь расходомеров переменного перепада давлений вводят линейризирующий преобразователь. Таким преобразователем служит, например, блок линейризации в промежуточном преобразователе НП-ПЗ. При непосредственной связи дифманометра с измерительным прибором (например, КСД) линейризация производится в самом приборе с помощью лекала с квадратичной характеристикой.

**Расходомеры постоянного перепада давлений.** Расход жидкости или газа можно измерять и при постоянном перепаде давлений. Для сохранения постоянного перепада давлений при изменении расхода через сужающее устройство необходимо автоматически изменять площадь его проходного сечения. Наиболее простой способ — автоматическое изменение площади проходного сечения в ротаметре (рис. 58).

Ротаметр представляет собой вертикальную конусную трубку 2, в которой находится поплавок 1. Измеряемый поток  $Q$ , проходя через ротаметр снизу вверх, создает перепад давлений до и после поплавка. Этот перепад давлений, в свою очередь, создает подъемную силу, которая уравнивает вес поплавка.

Если расход через ротаметр изменится, то изменится и перепад давлений. Это приведет к изменению подъемной силы и, следовательно, к нарушению равновесия поплавка. Поплавок начнет перемещаться. А так как трубка 2 ротаметра конусная, то при этом будет изменяться площадь проходного сечения в зазоре между поплавком и трубкой. В результате произойдет изменение перепада давлений, а следовательно, и подъемной силы. Когда перепад давлений и подъемная сила снова вернуться к прежним значениям, поплавок уравнивается и остановится.

Таким образом, каждому значению расхода через ротаметр  $Q$  соответствует определенное положение поплавка. Так как для конусной трубки площадь кольцевого зазора между ней и поплавком пропорциональна высоте его подъема  $l$ , то шкала ротаметра получается равномерной.

Промышленность выпускает ротаметры со стеклянными и металлическими трубками. У ротаметров со стеклянной трубкой РМ шкала нанесена прямо на поверхности трубки. Такие ротаметры могут применяться при давлении в трубопроводе до  $6 \cdot 10^5$  Па.

Для дистанционного измерения положения поплавка в металлической трубке используют промежуточные преобразователи линейного перемещения в унифицированный электрический или пневматический сигнал.

В ротаметрах с электрическим выходным сигналом типа РЭД (рис. 59, *а*) вместе с поплавком 1 перемещается плунжер дифференциально-трансформаторного преобразователя 3. В ротаметрах с пневматическим выходным сигналом типа РПД (рис. 59, *б*) для передачи положения поплавка преобразователю 4 используется магнитная муфта 5. Она состоит из двух постоянных магнитов. Один — сдвоенный — перемещается вместе с поплавком, другой, укрепленный на рычаге преобразователя перемещения в давление сжатого воздуха 4, движется вместе с рычагом вслед за первым магнитом.

Выпускаются также ротаметры РПФ для измерения расхода сильноагрессивных сред. У таких ротаметров все детали, соприкасающиеся с измеряемой средой, изготовлены из фторопласта-4. Ротаметры РПО снабжены рубашкой для парового обогрева. Они предназначены для измерения расхода кристаллизующихся сред.

**Расходомеры переменного уровня.** Из гидравлики известно, что если жидкость свободно вытекает через отверстие в дне бака, то ее расход  $Q$  и уровень в баке  $H$  связаны между собой. Следовательно, по уровню в баке можно судить о расходе из него.

На этом принципе основано действие расходомеров переменного уровня (рис. 60). Очевидно, что роль первичного преобразователя здесь выполняет сам бак 1 с отверстием 2 в дне. Выходной сигнал такого преобразователя — уровень в баке. Поэтому промежуточным преобразователем измерительной цепи расходомера переменного уровня может служить любой из рассмотренных уровнемеров.

Расходомеры переменного уровня обычно используют для измерения расхода агрессивных и загрязненных жидкостей

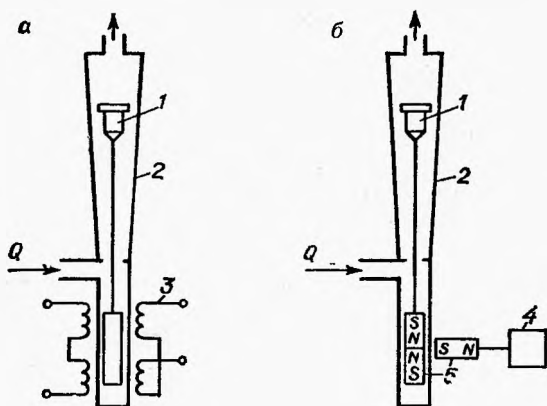


Рис. 59. Ротаметры с дистанционной передачей показаний:

*а* — с дифференциально-трансформаторным преобразователем; *б* — с пневматическим преобразователем;  
 1 — поплавок; 2 — конусная трубка; 3 — дифференциально-трансформаторный преобразователь; 4 — преобразователь перемещения в давление сжатого воздуха; 5 — магнитная муфта.

при сливе их в емкости, находящиеся под атмосферным давлением.

**Электромагнитные расходомеры.** Действие электромагнитных расходомеров основано на законе электромагнитной индукции, согласно которому в проводнике, движущемся в магнитном поле, будет наводиться э. д. с., пропорциональная скорости движения проводника. В электромагнитных расходомерах (рис. 61) роль проводника выполняет электропроводная жидкость, протекающая по трубопроводу 1 и пересекающая магнитное поле 3 электромагнита 2. При этом в жидкости будет наводиться э. д. с.  $U$ , пропорциональная скорости ее движения, т. е. расходу жидкости.

Выходной сигнал такого первичного преобразователя снимается двумя изолированными электродами 4 и 6, установленными в стенке трубопровода. Участок трубопровода по обе стороны от электродов покрывают электроизоляцией 7, чтобы исключить шунтирование наводимой э. д. с. через жидкость и стенку трубопровода.

В расходомерах ИР-11 и ИР-51 измерительная схема, выполненная в виде отдельного блока 5, преобразует наводимую э. д. с.  $U$  в унифицированный токовый сигнал  $i$ .

Расстояние между первичным преобразователем и измерительным блоком не должно превышать 100 м при электропроводности измеряемой среды до  $5 \cdot 10^{-2}$  См/м и 10 м при электропроводности среды до  $10^{-3}$  См/м. Сопротивление нагрузки не должно превышать 2,4 кОм.

Степень агрессивности измеряемых сред для электромагнитных расходомеров определяется материалом изоляции трубы и электродов первичного преобразователя. В расходомерах ИР,

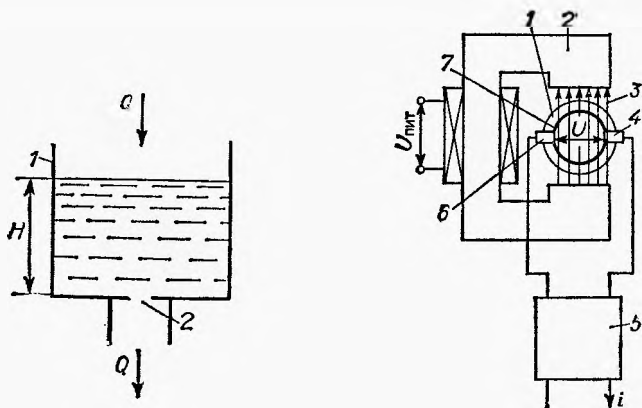


Рис. 60. Расходомер переменного уровня:  
1 — бак; 2 — отверстие.

Рис. 61. Электромагнитный расходомер:  
1 — трубопровод; 2 — электромагнит; 3 — магнитные силовые линии; 4, 6 — электроды;  
5 — измерительный блок; 7 — слой электроизоляции.

для этой цели используют резину, кислотостойкую эмаль и фторопласт. Наиболее стойким к воздействию агрессивных сред является расходомер с фторопластовым изоляционным покрытием и электродами из графитизированного фторопласта.

В процессе эксплуатации расходомеров ИР периодически, не реже одного раза в неделю должны проверяться нуль и градуировка прибора. Для проверки первичный преобразователь заполняют измеряемой жидкостью. После этого переключатель режима работы на передней панели измерительного блока переводят в положение «Измерение» и потенциометром «Нуль» стрелку измерительного прибора устанавливают на нулевую отметку. При переводе переключателя в положение «Калибровка» стрелка прибора должна остановиться на отметке 100%. В противном случае стрелку выводят на эту отметку потенциометром «Калибровка».

Отличительная особенность электромагнитных расходомеров — отсутствие дополнительных потерь давления на участке измерения. Это объясняется отсутствием деталей, выступающих внутрь трубы. Особенно ценным свойством таких расходомеров в отличие от расходомеров других типов является возможность измерения расхода агрессивных, абразивных и вязких жидкостей и пульп.

**Ультразвуковые расходомеры.** Действие этих расходомеров основано на сложении скорости распространения ультразвука в жидкости и скорости самого потока жидкости. Излучатель 1 и приемник 3 ультразвуковых импульсов расходомера (рис. 62) располагают на торцах измерительного участка трубопровода 2. Электронный блок 4 содержит генератор импульсов и измеритель времени прохождения импульсом расстояния между излучателем и приемником.

Перед началом эксплуатации расходомер заполняют жидкостью, расход которой будут измерять, и определяют время прохождения импульсом этого расстояния в стоячей среде. При движении потока его скорость будет складываться со скоростью ультразвука, что приведет к уменьшению времени пробега импульса. Это

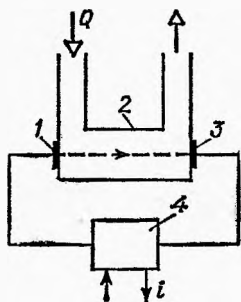


Рис. 62. Ультразвуковой расходомер:

1 — излучатель; 2 — трубопровод; 3 — приемник; 4 — электронный блок.

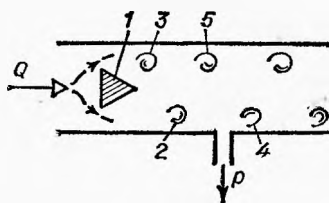


Рис. 63. Вихревой расходомер:

1 — тело; 2-5 — вихри.

время, преобразуемое в блоке 4 в унифицированный токовый сигнал  $i$ , будет тем меньше, чем больше скорость потока, т. е. чем больше его расход  $Q$ .

Ультразвуковые расходомеры обладают теми же достоинствами, что и электромагнитные, и кроме того могут измерять расход неэлектропроводных жидкостей.

**Вихревые расходомеры.** Действие таких расходомеров основано на явлении возникновения вихрей при встрече потока с телом необтекаемой формы 1 (рис. 63). При работе расходомера вихри 2—5 отрываются поочередно от противоположных сторон тела, расположенного поперек движения потока. Частота отрыва вихрей прямо пропорциональна скорости потока, т. е. его объемному расходу  $Q$ . В месте завихрения скорость потока увеличивается, давление  $p$  уменьшается. Поэтому частоту образования вихрей можно измерять, например, манометром, электрический выходной сигнал которого подают на частотомер.

**Тепловые расходомеры.** Тепловой расходомер состоит из нагревателя 1 и двух датчиков температуры 2 и 3, которые устанавливаются снаружи трубки 4 с измеряемым потоком (рис. 64, а). При постоянной мощности нагревателя количество тепла, забираемое от него потоком, будет также постоянным. Поэтому с увеличением расхода  $Q$  нагрев потока будет уменьшаться, что определяется по разности температур  $t_2 - t_1$ , измеряемой термодатчиками 3 и 2. Для измерения больших расходов измеряют не весь поток  $Q$ , а лишь его часть  $Q_1$ , которую пропускают по трубке 4 (рис. 64, б). Эта трубка шунтирует участок трубопровода 5, снабженный дросселем 6. Проходное сечение дросселя определяет верхнюю границу диапазона измеряемых расходов: чем больше это сечение, тем большие расходы можно измерять (при той же мощности нагревателя).

**Турбинные расходомеры.** В таких расходомерах измеряемый поток приводит в движение турбинку 1 (рис. 65), вращающуюся в подшипниках 2. Скорость вращения турбинки пропорциональна скорости потока, т. е. расходу  $Q$ . Для измерения скорости вращения турбинки ее корпус 3 изготавливают из немагнитного материала. Снаружи корпуса устанавливают дифференциально-трансформаторный преобразователь 4, а у одной из лопастей турбинки делают кромку из ферромагнитного материала. При прохождении этой лопасти мимо преобразовате-

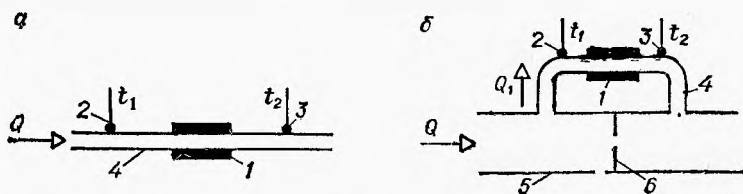
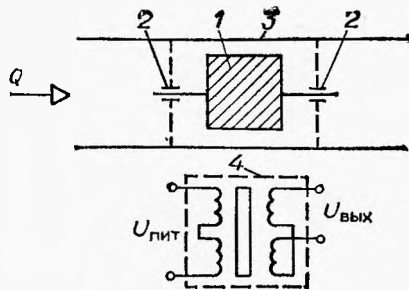


Рис. 64. Тепловые расходомеры:

а — для измерения малых расходов; б — для измерения средних и больших расходов; 1 — нагреватель; 2, 3 — датчики температуры; 4 — трубка; 5 — трубопровод; 6 — дроссель;

**Рис. 65. Турбинный расходомер:**  
 1 — турбинка; 2 — подшипники; 3 — корпус;  
 4 — преобразователь.



ля 4 меняется его индуктивное сопротивление и с частотой пропорциональной расходу  $Q$  изменяется напряжение на вторичных обмотках  $U_{\text{вых}}$ . Измерительным прибором такого расходомера является частотомер, измеряющий частоту изменения напряжения  $U_{\text{вых}}$ .

**Скоростные счетчики.** Эти счетчики аналогичны по устройству турбинным расходомерам (см. рис. 65). Разница между ними заключается в том, что в расходомерах измеряется скорость вращения турбинки, а в счетчиках — число ее оборотов, которое затем пересчитывается на количество жидкости, прошедшее через счетчик за интересующий нас интервал времени, например, за месяц.

### Контрольные вопросы

1. Как пересчитать скорость потока в трубопроводе известного сечения в расход?
2. В чем разница между расходомером и счетчиком?
3. Какое из стандартных сужающих устройств дает больший перепад давлений при одном и том же расходе?
4. Будет ли работать ротаметр, если в нем конусную трубку заменить цилиндрической?
5. Можно ли расходомером переменного уровня измерять расход, если в баке имеется избыточное давление?
6. Почему электромагнитным расходомером нельзя измерять расход неэлектропроводных жидкостей?
7. Можно ли измерять расход ультразвуковым расходомером, когда ультразвук распространяется навстречу потоку?
8. Для чего в ультразвуковых расходомерах измеряют время прохождения ультразвука в стоячей среде?
9. Влияет ли на работу вихревого расходомера расстояние от тела (источника вихрей) до места отбора давления?
10. Из каких измерительных преобразователей можно составить измерительную цепь для передачи на щит оператора результатов измерения расхода: расходомером переменного перепада давлений? расходомером постоянного перепада давлений? расходомером переменного уровня? вихревым расходомером?

## § 20. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температура является важным параметром, определяющим не только протекание технологического процесса, но и свойства вещества. Для измерения температуры в системе единиц СИ принята температурная шкала с единицей температуры Кельвин (К). Начальной точкой этой шкалы является абсолютный нуль (0 К).



Для технологических измерений часто применяют температурную шкалу с единицей температуры градус Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Для измерения температуры используют различные первичные преобразователи, отличающиеся способом преобразования температуры в промежуточный сигнал. В промышленности наибольшее применение получили следующие первичные преобразователи: термометры расширения, манометрические термометры, термометры сопротивления, термопары (термоэлектрические пирометры) и пирометры излучения. Все они, за исключением пирометров излучения, в процессе эксплуатации находятся в контакте с измеряемой средой.

**Термометры расширения.** Действие термометров расширения основано на изменении объема жидкостей и твердых тел при изменении температуры. Из термометров расширения наиболее широко применяют жидкостные стеклянные термометры (рис. 66). Такой термометр заполняется жидкостью (ртуть, толуол, этиловый спирт и др.), которая с увеличением температуры расширяется и поднимается вверх по капилляру.

Таким образом, температура, измеряемая жидкостным термометром, преобразуется в линейное перемещение жидкости. Шкала наносится прямо на поверхность капилляра или прикрепляется к нему снаружи. Технические жидкостные стеклянные термометры применяют для измерения температур от  $-30$  до  $600^{\circ}\text{C}$ .

При монтаже стеклянный термометр помещают в защитную металлическую оправу, изолирующую его от измеряемой среды.

Для уменьшения инерционности измерения в кольцевой зазор между термометром и стенкой оправы при измерении температуры до  $150^{\circ}\text{C}$  заливают машинное масло; при измерении более высоких температур в зазор насыпают медные опилки,

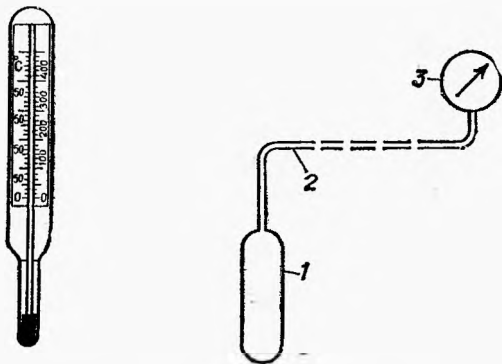


Рис. 66. Термометр расширения.

Рис. 67. Манометрический термометр:

1 — термобаллон; 2 — капилляр; 3 — манометр.

**Манометрические термометры.** Действие манометрических термометров основано на изменении давления газа, пара или жидкости в замкнутом объеме при изменении температуры. Манометрический термометр (рис. 67) состоит из термобаллона 1, гибкого капилляра 2 и манометра 3.

В зависимости от заполняющего вещества манометрические термометры делятся на газовые (ТПГ, ТДГ и др.), парожидкостные (ТПП) и жидкостные (ТПЖ, ТДЖ и др.). Область измерения температур манометрическими термометрами от  $-60$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ .

Термобаллон манометрического термометра помещают в измеряемую среду. При нагреве термобаллона внутри замкнутого объема увеличивается давление, которое измеряется манометром. Шкала манометра градуируется в единицах температуры. Капилляр (обычно латунная трубка внутренним диаметром, составляющим доли миллиметра) позволяет удалить манометр от места установки термобаллона на расстояние до 40 м. Капилляр по всей длине защищен оболочкой из стальной ленты.

Манометрические термометры могут применяться во взрывоопасных помещениях. При необходимости передачи результатов измерений на расстояние более 40 м манометрические термометры снабжают промежуточными преобразователями с унифицированными выходными пневматическими или электрическими сигналами.

Наиболее уязвимыми в конструкции манометрических термометров являются места присоединения капилляра к термобаллону и манометру. Поэтому монтировать и обслуживать такие приборы следует осторожно.

**Термометры сопротивления.** Действие термометров сопротивления основано на свойстве тел изменять электрическое сопротивление при изменении температуры. У металлических термометров сопротивление с возрастанием температуры увеличивается практически линейно, у полупроводниковых, наоборот, уменьшается.

Металлические термометры сопротивления (рис. 68) изготовляют из

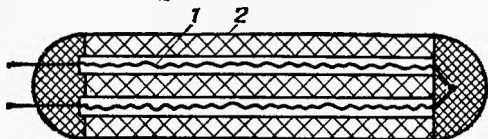


Рис. 68. Термометр сопротивления:  
1 — проволока; 2 — корпус.

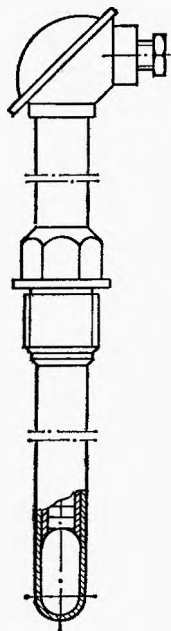


Рис. 69. Общий вид термометра сопротивления.

тонкой медной или платиновой проволоки 1, помещенной в электроизоляционный корпус 2. Зависимость электрического сопротивления от температуры (для медных термометров от  $-50$  до  $+180^{\circ}\text{C}$ , для платиновых — от  $-200$  до  $+750^{\circ}\text{C}$ ) весьма стабильна и воспроизводима. Это обеспечивает взаимозаменяемость термометров сопротивления.

Для защиты термометров сопротивления от воздействия измеряемой среды применяют защитные чехлы (рис. 69). Приборостроительная промышленность выпускает много модификаций защитных чехлов, рассчитанных на эксплуатацию термометров при различном давлении (от атмосферного до  $500 \cdot 10^5$  Па), различной агрессивности измеряемой среды, обладающих разной инерционностью (от 40 с до 4 мин) и глубиной погружения (от 70 до 2000 мм).

Полупроводниковые термометры сопротивления (термисторы) для измерений в промышленности применяют редко, хотя их чувствительность гораздо выше, чем проволочных термометров сопротивления. Это объясняется тем, что градуировочные характеристики термисторов значительно отличаются друг от друга, что затрудняет их взаимозаменяемость.

Термометры сопротивления представляют собой первичные преобразователи с удобным для дистанционной передачи сигналом — электрическим сопротивлением. Для измерения такого сигнала обычно применяют автоматические уравновешенные мосты (см. рис. 45). При необходимости выходной сигнал термометра сопротивления может быть преобразован в унифицированный. Для этого в измерительную цепь включают промежуточный преобразователь НП-СЛ1-М (см. рис. 40). В этом случае измерительным будет прибор для измерения постоянного тока (см. рис. 43, в).

**Термопары.** Принцип действия термопар (термоэлектрических пирометров) основан на свойстве двух разнородных проводников создавать термоэлектродвижущую силу (термо-э. д. с.) при нагревании места их соединения — спая. Проводники в этом случае называются термоэлектродами, а все устройство — термопарой.

Величина термо-э. д. с. термопары  $U$  (рис. 70) зависит от материала термоэлектродов  $A$  и  $B$  и разности температур горячего спая  $t_r$  и холодных спаев  $t_x$ . Поэтому при измерении температуры горячего спая температуру холодных спаев стабилизируют или вводят поправку на ее изменение.

В промышленных условиях стабилизация температуры холодных спаев термопары затруднительна и обычно используют второй способ — автоматическое введение поправки на температуру холодных спаев. Для этого применяют неуравновешенный мост, включаемый последовательно с термопарой (рис. 71).

В одно плечо такого моста включен медный резистор  $R_m$ , расположенный около холодных спаев. При изменении температуры холодных спаев термопары  $t_x$  изменяется сопротивле-

ние резистора  $R_m$  и выходное напряжение неуравновешенного моста  $U_1$ . Мост подбирают таким образом, чтобы изменение напряжения было равно по величине и противоположно по знаку изменению э. д. с. термопары вследствие колебаний температуры холодных спаев.

Термопары являются первичными преобразователями температуры в э. д. с. — сигнал, удобный для дистанционной передачи. Поэтому в измерительную цепь за термопарой может быть сразу включен измерительный прибор. Для измерения э. д. с. термопары обычно применяют автоматические потенциометры.

В автоматических потенциометрах (см. рис. 43), работающих в комплекте с термопарами, медный резистор  $R_m$  включается в одно плечо моста  $I$ . Показания такого потенциометра будут изменяться лишь при изменении температуры горячего спаи термопары. Это объясняется тем, что изменение э. д. с. термопары под воздействием температуры холодных спаев будет автоматически компенсироваться дополнительным изменением выходного напряжения моста вследствие изменения сопротивления резистора  $R_m$ .

Если э. д. с. термопары преобразуют в унифицированный сигнал промежуточным преобразователем НП-ТЛ1-М, то компенсация температуры холодных спаев производится неуравновешенным мостом, который входит в состав преобразователя.

Медный резистор размещают в потенциометре или промежуточном преобразователе. Следовательно, там же должны находиться и холодные спаи термопары. В этом случае длина термопары должна быть равна расстоянию от места измерения температуры  $t_r$  до места установки прибора. Такое условие практически невыполнимо, так как термоэлектроды термопар (жесткая проволока) неудобны для монтажа. Поэтому для соединения термопары с прибором применяют специальные соединительные провода, подобные по термоэлектрическим свойствам термоэлектродам термопар. Такие провода

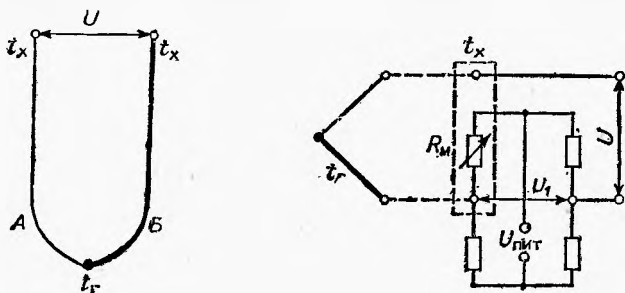


Рис. 70. Термопара:  
А, Б — термоэлектроды.

Рис. 71. Схема автоматического введения поправки на температуру холодных спаев термопары.

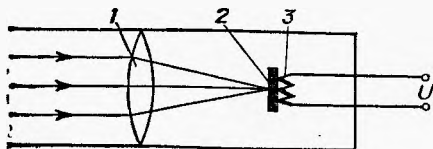


Рис. 72. Радиационный пирометр:  
1 — объектив; 2 — зачерненная пластинка; 3 — батарея термопар.

переносятся к измерительному

прибору или преобразователю.

В промышленности применяют различные термопары, термоэлектроды которых изготовлены как из чистых металлов (платина), так и из сплавов хрома и никеля (хромель), меди и никеля (копель), алюминия и никеля (алюмель), платины и родия (платинородий), вольфрама и рения (вольфрамрений). Материалы термоэлектродов определяют предельное значение измеряемой температуры. Наиболее распространенные термоэлектродные пары образуют стандартные термопары: хромель-копель (предельная температура  $600^{\circ}\text{C}$ ), хромель-алюмель (предельная температура  $1000^{\circ}\text{C}$ ), платинородий-платина (предельная температура  $1600^{\circ}\text{C}$ ) и вольфрамрений с 5 % рения — вольфрамрений с 20 % рения (предельная температура  $2200^{\circ}\text{C}$ ).

Промышленные термопары отличаются высокой стабильностью и воспроизводимостью градуировочных характеристик, что позволяет заменять их без какой-либо переналадки остальных элементов измерительной цепи.

Термопары, как и термометры сопротивления, устанавливают в защитных чехлах, на которых указан тип термопары. Для высокотемпературных термопар применяют защитные чехлы из теплостойких материалов: фарфора, оксида алюминия, карбида кремния и т. п.

**Пирометры излучения.** Пирометры излучения предназначены для бесконтактного измерения температуры по тепловому излучению нагретых тел. Наиболее распространены радиационные пирометры.

Действие радиационного пирометра основано на измерении всей энергии излучения нагретого тела. Схема такого пирометра приведена на рис. 72. Лучи от нагретого тела объективом 1 фокусируются на зачерненной пластинке 2 и нагревают ее. Температура пластинки при этом оказывается пропорциональной энергии излучения, которая, в свою очередь, зависит от измеряемой температуры. Для измерения температуры пластинки обычно применяют батарею последовательно включенных термопар 3, э. д. с. которой  $U$  измеряется автоматическим потенциометром.

Радиационные пирометры РАПИР применяют для измерения температур от  $100$  до  $2500^{\circ}\text{C}$ . В комплект пирометра входят телескоп ТЕРА-50, измерительный прибор и вспомогательное оборудование, предназначенное для защиты телескопа от воздействия измеряемой среды (копоти, пыли, высокой температуры).

## Контрольные вопросы

1. Какие из датчиков температуры можно применять для измерения отрицательных температур?
2. Как влияет на погрешность измерения расстояние между датчиком и измерительным прибором у манометрического термометра? у термометра сопротивления? у термопары?
3. Какую температуру покажет потенциометр, соединенный с термопарой, если температуры ее горячего и холодных спаев равны?
4. Как влияет толщина защитного чехла термодатчика на его динамическую погрешность?
5. Почему для соединения термометра сопротивления с мостом применяют медные провода, а для соединения термопары с потенциометром необходимы специальные (компенсационные) провода?
6. Из каких измерительных преобразователей можно составить измерительную цепь для передачи результатов измерения температуры на УВМ, имеющую унифицированные входные сигналы?
7. Чем отличается пирометр излучения от остальных датчиков температуры?

## § 21. ИЗМЕРЕНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

Управление технологическими процессами только по таким параметрам, как давление, уровень, расход и температура, часто не гарантирует получение продуктов требуемого качества. Во многих случаях необходим автоматический контроль состава и свойств вырабатываемых продуктов. Приборы для такого контроля — это автоматические анализаторы влажности, вязкости, концентрации, плотности, прозрачности и т. п.

Большинство выпускаемых промышленностью автоматических анализаторов предназначено для определения состава и свойств бинарных и псевдобинарных смесей. Бинарной смесью называют газовую смесь, состоящую из двух газов, или жидкость, содержащую один растворенный компонент. Анализ бинарной смеси возможен при условии, что составляющие ее компоненты отличаются друг от друга какими-либо физическими или физико-химическими свойствами. Псевдобинарную называют многокомпонентную смесь, в которой неопределяемые компоненты резко отличаются по физическим или физико-химическим свойствам от определяемого компонента. Анализ такой смеси аналогичен анализу бинарной смеси.

Анализ многокомпонентных смесей, содержащих три и более компонента, проводят только после их предварительного разделения на отдельные компоненты.

Специфической особенностью аналитических измерений является сильное влияние на их результаты побочных факторов (температуры, давления, скорости движения вещества и т. п.). Эти факторы особенно влияют на точность таких аналитических приборов, принцип действия которых основан на использовании какого-либо одного свойства вещества (электропроводности, теплопроводности, магнитной или диэлектрической проницаемости и др.). Поэтому автоматические анализаторы обычно оснащены сложным дополнительным оборудованием для отбора пробы,

подготовки ее к анализу, стабилизации условий измерений или автоматического введения поправки и т. п.

Многообразие анализируемых веществ и широкий диапазон их составов и свойств обусловили производство автоматических приборов с чрезвычайно разнообразными методами анализа. Приборостроительная промышленность выпускает разнообразные автоматические анализаторы: плотномеры, вискозиметры, газоанализаторы, влагомеры, хроматографы, нефелометры и т. д. Если приборы для измерения таких общетехнических параметров, как давление, уровень, расход и температура, применяются практически во всех производствах, то анализаторы, напротив, как правило, для специфических задач конкретного производства.

**Измерение плотности.** Измерение плотности является одним из методов, позволяющих непосредственно в процессе производства определять такие свойства жидкостей, как концентрация кислот и щелочей, состав пульпы и т. п.

Для измерения плотности жидкостей чаще всего применяют буйковые, весовые, гидростатические и радиоизотопные плотномеры.

Принцип действия буйковых плотномеров (рис. 73) аналогичен принципу действия буйковых уровнемеров. Здесь также применяется неподвижный буюк 3, передающий выталкивающее его усилие  $F$  на рычаг 1 промежуточного преобразователя 2. В отличие от буйкового уровнемера, здесь буюк всегда полностью погружен в измеряемую жидкость и поэтому ее объем, вытесненный буюком, постоянный. Поэтому сила  $F$  в соответствии с законом Архимеда будет изменяться только в зависимости от плотности жидкости.

В зависимости от типа промежуточного преобразователя 2 плотномер может иметь электрический или пневматический унифицированный выходной сигнал.

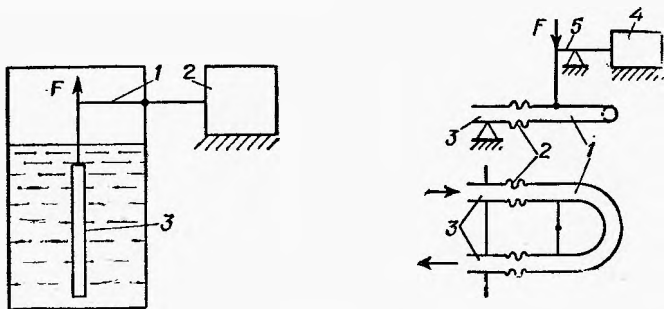


Рис. 73. Буйковый плотномер:

1 — рычаг; 2 — промежуточный преобразователь силы в промежуточный сигнал; 3 — буюк.

Рис. 74. Весовой плотномер:

1 — петля; 2 — сильфоны; 3 — трубопровод; 4 — промежуточный преобразователь, 5 — рычаг.

В весовых плотномерах (рис. 74) непрерывно взвешивается постоянный объем жидкости. В таких плотномерах жидкость протекает по петлеобразному участку трубы 1, соединенному с основным трубопроводом 3 гибкими соединениями 2 (сильфонами). Вес трубы с жидкостью  $F$  пропорционален плотности протекающей по петле жидкости. Измерение веса петли производится преобразователем 4 (электрическим или пневматическим), к рычагу 5 которого подвешена труба 1.

Действие гидростатического плотмера основано на том, что давление, создаваемое столбом жидкости постоянной высоты, пропорционально ее плотности. Для измерения плотности таким способом нет необходимости поддерживать постоянный уровень измеряемой жидкости в емкости. Достаточно применить в качестве измерительного устройства дифманометр, который включается по схеме, приведенной на рис. 75. При таком включении он измеряет разность давлений  $\Delta p$ , создаваемых двумя столбами жидкости  $H_1$  и  $H_2$ . Ясно, что при любом уровне в емкости разность  $\Delta H$  столбов жидкости постоянна и перепад давлений будет зависеть только от плотности жидкости.

Применение в гидростатических плотмерах в качестве измерительного устройства дифманометра позволяет использовать их в емкостях с избыточным давлением, поскольку оно оказывает одинаковое воздействие на обе камеры дифманометра — плюсовую и минусовую и не влияет на результат измерения.

Радиоизотопные плотмеры, в отличие от рассмотренных выше, позволяют измерять плотность неконтактным способом. Их действие основано на ослаблении радиоактивного излучения с повышением плотности измеряемой жидкости.

В состав радиоизотопного плотмера (рис. 76) входят источник 1 и приемник 2  $\gamma$ -излучения, выходной сигнал которого подается на автоматический потенциометр 3. Интенсивность излучения, воспринимаемая приемником 2, зависит от плотности протекающей по трубопроводу жидкости: чем больше плотность, тем сильнее поглощение  $\gamma$ -излучения и тем меньше сигнал на входе приемника 2. На величину этого сигнала будут влиять также толщина стенок трубы, состав жидкости и другие факторы, уменьшающие излучение источника. Так как влияние этих факторов стабильно, оно учиты-

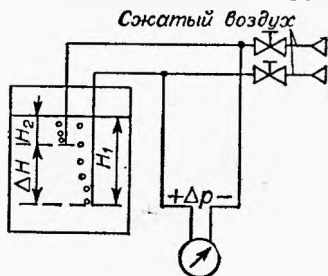


Рис. 75. Гидростатический плотномер.

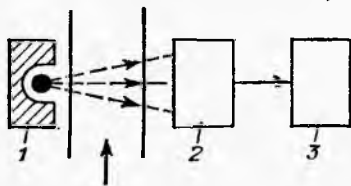


Рис. 76. Радиоизотопный плотномер:

1 — источник излучения; 2 — приемник; 3 — потенциометр.



вается путем введения в показания поправки, полученной при градуировке прибора.

**Измерение вязкости.** Вязкость — один из показателей качества горючесмазочных материалов, красок, синтетических смол и т. п. Например, в производстве полимеров и различных продуктов на их основе вязкость служит важнейшим технологическим параметром, так как по ее величине можно оценить молекулярную массу и концентрацию вещества, а также его структуру в расплаве или растворе.

Вязкость — это способность вещества оказывать сопротивление перемещению в нем какого-либо тела. Если вещество само движется относительно тела, то возникает сопротивление его движению (этим объясняется гидравлическое сопротивление трубопроводов).

Для измерения вязкости применяют вибрационные и ротационные вискозиметры.

Действие в и б р а ц и о н н ы х вискозиметров основано на том, что жидкость стремится затормозить колебания опущенной в нее плоской пластины, причем сила торможения зависит от вязкости жидкости.

В датчике вискозиметра (рис. 77) пластина 1 закреплена в эластичной мембране 2. Нижняя часть пластины погружена в жидкость, а верхняя находится в катушке 3, соединенной с генератором импульсов 4. При включении катушки в пластине возникают продольные колебания. Затем катушка отключается от генератора и колебания пластины затухают.

В процессе свободных колебаний пластины в катушке наводится э. д. с., имеющая частоту ее свободных колебаний. Она обеспечивает запираание генератора 4 до момента полного прекращения колебаний, после чего генератор снова включает катушку и цикл повторяется. Чем больше вязкость жидкости, тем быстрее затухают колебания пластины и тем меньше интервалы

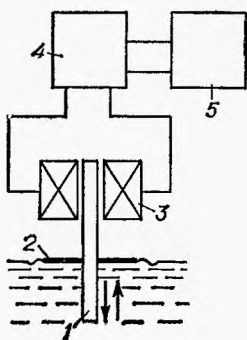


Рис. 77. Вибрационный вискозиметр:

1 — пластина; 2 — мембрана; 3 — катушка; 4 — генератор; 5 — измерительный прибор.

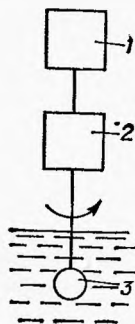


Рис. 78. Ротационный вискозиметр:

1 — привод; 2 — измерительное устройство; 3 — рабочее тело.

между включениями генератора. Прибор 5 измеряет величину этих интервалов.

Вибрационный вискозиметр выпускается для работы как в узком (0—50 сПз), так и в широком (0—500 000 сПз) диапазоне изменения вязкости.

Принцип действия ротационных вискозиметров основан на измерении сопротивления, которое оказывает жидкость вращению погруженного в нее тела. Это сопротивление растет с увеличением вязкости жидкости.

Ротационный вискозиметр (рис. 78) состоит из привода 1, измерительного устройства 2 и рабочего тела 3. В одних приборах поддерживают постоянную скорость вращения тела и измеряют мощность, которую затрачивает на эту работу привод. В других используют привод постоянной мощности, а измеряют скорость вращения тела. Очевидно, что в первом случае с увеличением вязкости жидкости потребуется большая мощность привода, во втором — это приведет к уменьшению скорости вращения тела.

Ротационные вискозиметры выпускают для измерения вязкости до 100 000 сПз. Имеются модификации с электрическим и пневматическим выходным сигналом.

**Измерение влажности.** Влажность газов, жидкостей и твердых материалов — один из важных показателей в технологических процессах. Влажность газов, например, необходимо измерять в сушильных установках, при очистке газов, в газосборниках, при кондиционировании воздуха и т. д. Измерение содержания воды в нефти, спиртах, ацетоне проводят в процессах нефтепереработки и нефтехимии, в пульпах — в производстве серной кислоты и минеральных удобрений. Измерение влажности твердых сыпучих материалов занимает важное место в производстве красок, минеральных удобрений, строительных материалов; влажность волокнистых материалов определяет качество продукции при производстве бумаги и картона.

Влажность газов в технологических процессах обычно измеряют психрометрическим методом.

Действие психрометрических влагомеров основано на измерении двух температур: температуры «сухого» термоматчика, помещенного в анализируемый газ, и температуры «мокрого» термоматчика, завернутого в чулок из влажной ткани, конец которой опущен в воду. За счет испарения воды этот термоматчик охлаждается до температуры меньшей, чем температура газа. С увеличением влажности газа испарение идет менее интенсивно и температура «мокрого» термометра растет. При влажности 100 % вода вообще не будет испаряться и температуры обоих термоматчиков сравняются.

В промышленных влагомерах в качестве термоматчиков обычно используют термометры сопротивления, включенные в схему для измерения отношения их сопротивлений, т. е. отношения температур «мокрого» и «сухого» термометров.

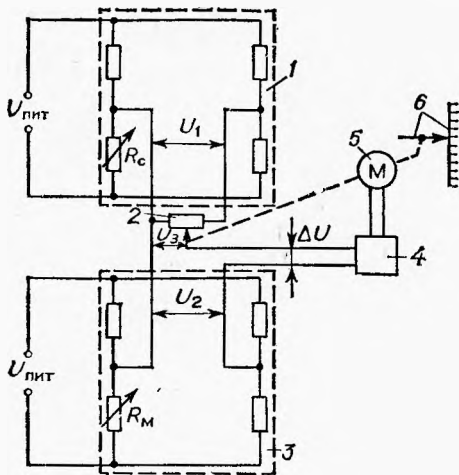


Рис. 79. Психрометрический влагомер: 1 и 3 — неуравновешенные мосты; 2 — реохорд; 4 — усилитель; 5 — реверсивный электродвигатель; 6 — показывающее устройство.

Из принципиальной схемы влагомера (рис. 79) видно, что она состоит из двух неуравновешенных мостов 1 и 3, реохорда 2, усилителя 4, реверсивного электродвигателя 5 и показывающего устройства 6. В плечи неуравновешенных мостов 1 и 3 включены соответственно «сухой» ( $R_c$ ) и «мокрый» ( $R_m$ ) термометры. Выходной сигнал моста 3 — напряже-

ние  $U_2$  включен встречно с напряжением  $U_3$ , снимаемым с движка реохорда. Их разность  $\Delta U$  приложена к входу усилителя 4. Там она усиливается и приводит в действие реверсивный электродвигатель 5. Вал электродвигателя перемещает движок реохорда 2 и связанную с ним стрелку показывающего устройства 6.

Состояние равновесия в схеме наступает при равенстве напряжений  $U_2$  и  $U_3$ . При этом  $\Delta U = 0$ , поэтому движок реохорда и стрелка прибора перестают перемещаться. Положение движка реохорда в момент равновесия зависит от отношения напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , а значит, от отношения температур «сухого» ( $t_c$ ) и «мокрого» ( $t_m$ ) термометров. Таким образом, положение стрелки прибора однозначно связано с измеряемой влажностью газа.

Для измерения влажности жидкостей применяют как специальные влагомеры, так и приборы, измеряющие какое-либо свойство жидкости, если оно связано с ее влажностью. Например, одной из характеристик пульпы является соотношение жидкость: твердое в ее составе. Эту величину измеряют обычно плотномерами. В тех случаях, когда из пульпы удаляется только жидкая фаза (выпаривание, фильтрование), показания плотномера будут определяться содержанием жидкости в пульпе. В этом случае плотномер выполняет функцию влагомера.

В специальных влагомерах для жидкостей используют емкостный и абсорбционный методы измерения.

Действие емкостных влагомеров основано на изменении диэлектрической проницаемости жидкости при изменении содержания в ней воды. Электрическая схема такого влагомера аналогична электрической схеме емкостного уровнемера (см. рис. 54). Изменение влажности жидкости приводит к изменению емкости  $C_x$  и выходного напряжения моста  $U$ . Такими влагомерами измеряют содержание воды в нефти на нефтеперерабатывающих заводах. Диапазон измерения прибора 0—1 %.

Принцип действия абсорбционных влагомеров для жидкости основан на поглощении водой энергии излучения в области спектра близкой к инфракрасной. Принципиальная схема такого влагомера приведена на рис. 80.

Жидкость пропускают через камеру 2, где через нее проходит поток излучения  $\Phi_1$  от источника 1. Так как в камере часть энергии поглощается влагой, энергия выходящего потока  $\Phi_2$  будет тем меньше, чем больше концентрация влаги в смеси. Поток  $\Phi_2$  измеряется приемником 3.

Источником излучения служит лампа накаливания, приемником — фоторезистор. Промышленные анализаторы влажности служат для определения концентрации влаги в ацетоне и спиртах от 0 до 5 %.

Сложность измерения влажности твердых сыпучих и волокнистых материалов заключается в том, что при взаимодействии датчика с материалом может изменяться его структура, насыпная плотность и другие факторы, существенно увеличивающие погрешность прибора. Поэтому в промышленности нашли применение в основном бесконтактные методы измерения: оптический и сверхвысокочастотный.

В оптических влагомерах используется связь между влажностью вещества и потоком отраженного от него излучения. Для получения наибольшей чувствительности применяют излучение в инфракрасной области спектра, которое создается источником 1 (рис. 81). Отраженный анализируемым материалом 2 световой поток направляется собирающим устройством 3 на приемник 4. Чем больше влажность материала, тем лучше он поглощает инфракрасное излучение и тем меньше величина отраженного потока.

Поскольку таким методом можно измерить влажность лишь тонкого слоя (5—30 мм), влагомер обычно применяют для сыпучих материалов, транспортируемых по конвейерным лентам. Оптические влагомеры типа «Берег» позволяют анализировать материалы с влажностью до 80 %.

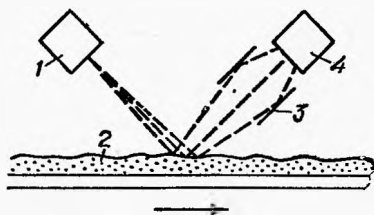
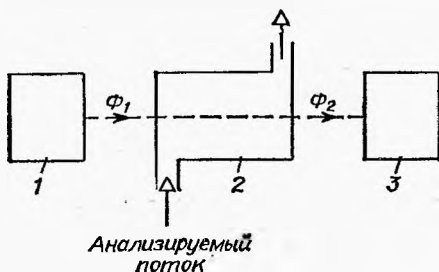


Рис. 80. Абсорбционный влагомер:

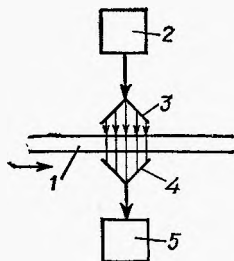
1 — источник излучения; 2 — камера; 3 — приемник излучения.

Рис. 81. Оптический влагомер:

1 — источник излучения; 2 — анализируемый материал; 3 — собирающее устройство; 4 — приемник излучения.

Рис. 82. Сверхвысокочастотный влагомер:

1 — анализируемый материал; 2 — СВЧ-генератор; 3 — передающая антенна; 4 — приемная антенна; 5 — измерительный прибор.



Сверхвысокочастотные (СВЧ) влагомеры используют значительное (в десятки раз) различие электрических свойств воды и сухого материала. Концентрацию влаги измеряют по ослаблению СВЧ-излучения, проходящего через слой анализируемого материала.

В таких влагомерах (рис. 82) лента материала 1 (например, волокнистого: бумага, картон) проходит между передающей 3 и приемной 4 антеннами. Передающая антенна соединена с СВЧ-генератором 2, приемная — с измерительным устройством 5. Чем больше влажность анализируемого материала, тем меньше сигнал, попадающий в измерительное устройство.

СВЧ-влагомеры позволяют измерять влажность в широком диапазоне (0—100 %) с высокой точностью.

### Контрольные вопросы

1. Повлияет ли на работу буйкового плотномера зарастание поплавка?
2. Какое допустимо понижение уровня в баке без потери работоспособности гидростатического плотномера?
3. Влияет ли расход измеряемой жидкости на погрешность измерения весового плотномера?
4. Какие вискозиметры можно применить для измерения вязкости жидкости в трубопроводах? в емкостях?
5. Почему в психрометрическом влагомере «мокрый» термометр показывает меньшую температуру, чем «сухой»? Какую влажность покажет прибор, если кончится вода, смачивающая «мокрый» термометр?
6. На каком принципе основано действие емкостных влагомеров? абсорбционных влагомеров?
7. Влияет ли прозрачность жидкости на погрешность измерения емкостного влагомера? абсорбционного влагомера?

## § 22. ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА ВЕЩЕСТВ

**Анализаторы жидкостей.** Кондуктометрический метод анализа основан на измерении электропроводности растворов электролитов, в которых перенос тока происходит за счет движения ионов. Электропроводность характеризует суммарную концентрацию ионов в растворе. Зависимость электропроводности от концентрации носит сложный характер: с увеличением концентрации электропроводность раствора сначала увеличивается, а затем уменьшается. Поэтому для каждого кондуктометрического концентратомера установлены свои пределы измерений в единицах электропроводности (См/см) или концентрации (г/л).

Для измерения концентрации растворов по их электропроводности используют электродные и безэлектродные приборы.

Электродный датчик концентромера представляет собой четырехэлектродную ячейку (рис. 83), через которую непрерывно протекает анализируемый раствор. Через внешние электроды 1 и 4 ячейка подключена к источнику питания, который поддерживает в ней постоянную силу тока  $i$ . В этом случае напряжение  $U_x$  между внутренними электродами 2 и 3 будет зависеть от электропроводности анализируемого раствора, т. е. от его концентрации. Это напряжение измеряют автоматическим потенциометром 5.

Для измерения растворов, способных загрязнять электроды, применяют безэлектродные датчики. В таком датчике (рис. 84) анализируемый раствор протекает по кольцевой пластмассовой трубе 2. Эта труба является одновременно вторичной обмоткой трансформатора Тр1, к первичной обмотке 1 которого подведено напряжение  $U_{пит}$ , и первичной обмоткой трансформатора Тр2. Напряжение  $U_x$ , снимаемое со вторичной обмотки 3 этого трансформатора, является выходным сигналом датчика. Это напряжение будет тем больше, чем больше концентрация анализируемого раствора.

Потенциометрический метод анализа основан на зависимости между э. д. с., развиваемой датчиком, и концентрацией водородных ионов в анализируемой жидкости. Концентрацию водородных ионов, характеризующую кислотность и щелочность раствора, принято измерять в единицах водородного показателя рН: при  $pH = 7$  раствор нейтральный, при  $pH > 7$  — щелочной, при  $pH < 7$  — кислотный. Поэтому потенциометрические анализаторы называют также рН-метрами.

Датчик рН-метра (рис. 85) состоит из двух электродов: измерительного 1 и сравнительного 2. Измерительный электрод представляет собой стеклянную трубку, к нижней части которой приварен шарик из специального стекла, содержащего

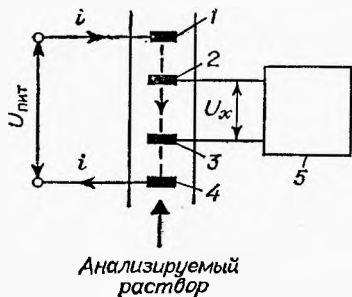


Рис. 83. Электродный датчик концентромера:  
1—4 — электроды; 5 — потенциометр.

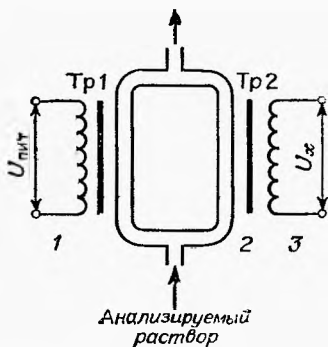


Рис. 84. Безэлектродный датчик концентромера:

1 — первичная обмотка трансформатора; 2 — труба; 3 — вторичная обмотка трансформатора.

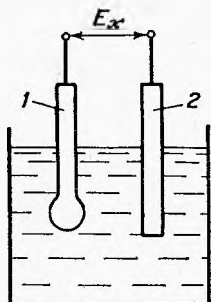


Рис. 85. Датчик рН-метра:  
1 — измерительный электрод; 2 — сравнительный электрод.

металл (литий или натрий). Ионы водорода из раствора проникают в стекло шарика, а ионы металла переходят из стекла в раствор. В результате на поверхности шарика возникает потенциал, величина которого зависит от концентрации водородных ионов в растворе. Сравнительный электрод, в отличие от измерительного, не меняет свой потенциал относительно раствора. Поэтому э. д. с. датчика  $E_x$  зависит только от потенциала измерительного электрода и, следовательно, рН раствора.

Стекланный электрод датчика имеет очень высокое сопротивление. Поэтому для измерения э. д. с. датчика применяют специальный потенциометр, имеющий высокоомный вход, или используют промежуточный преобразователь также с высокоомным входом, выходной сигнал которого (ток в диапазоне 0—5 мА) позволяет применить прибор типа КСУ.

В оптических анализаторах используется связь между составом анализируемой жидкости и законами распространения через нее света. Наиболее распространенными оптическими анализаторами являются рефрактометры и колориметры.

В рефрактометрах для анализа используется способность света изменять свое направление при переходе из одной среды в другую вследствие различия их оптических свойств. Если оптические свойства одной среды остаются неизменными (эталонная среда), а другой — зависят от концентрации одного из компонентов жидкости, то по отклонению луча света можно измерять концентрацию этого компонента. На рис. 86 приведена схема рефрактометра, в котором анализируемый раствор пропускают через дифференциальную кювету, состоящую из двух кювет 4 и 6. Обе кюветы представляют собой призмы, имеющие

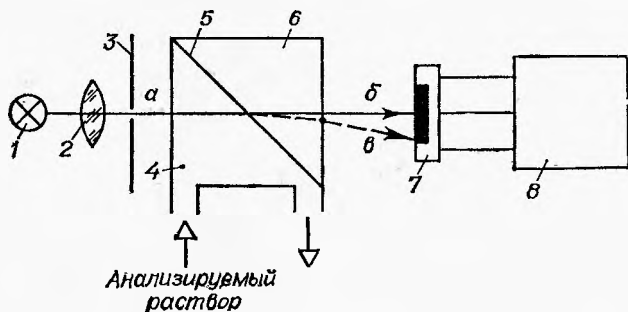


Рис. 86. Рефрактометр:

1 — источник света; 2 — линза; 3 — диафрагма; 4, 6 — кюветы; 5 — стенка; 7 — двойной фоторезистор; 8 — мост.

общую стенку 5. Через кювету 4 пропускают анализируемый раствор, а в кювете 6 находится эталонная жидкость.

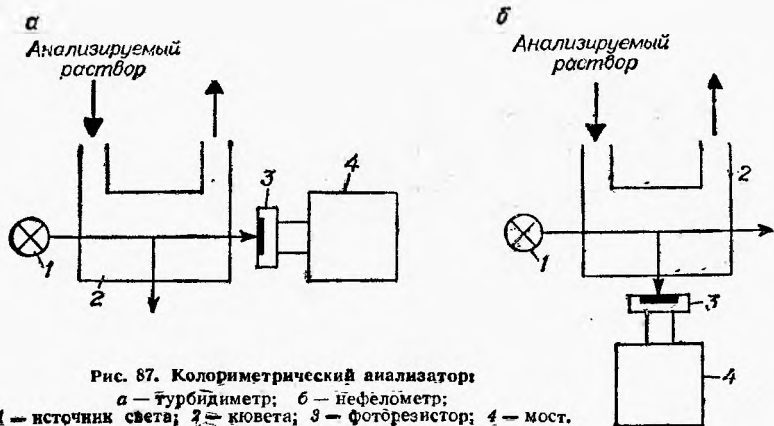
Свет от источника 1 с помощью линзы 2 и диафрагмы 3 преобразуется в световую полоску *a*, которая, пройдя через обе кюветы, попадает на сдвоенный фоторезистор 7. Если оптические свойства жидкостей в кюветах 4 и 6 одинаковы, направление выходящего светового потока *b* совпадает с направлением входного потока *a*. В этом случае оба фоторезистора освещены одинаково и их сопротивления равны.

При изменении оптических свойств анализируемого раствора световой поток дважды изменит свое направление: при входе в эталонную кювету 6 и при выходе из нее. В результате смещения луча в направлении *b* освещенность нижнего (по схеме) фоторезистора увеличится, а верхнего — уменьшится. Изменение сопротивлений фоторезисторов измеряется мостовой схемой 8.

Рефрактометры применяют для анализа бензина, керосина, соляной и азотной кислот, спиртов и других жидкостей. Конструкция кювет некоторых рефрактометров позволяет использовать их для агрессивных, токсичных, полимеризующихся и высокотемпературных сред.

Действие колориметрических анализаторов основано на поглощении или рассеивании светового потока, проходящего через жидкость, например суспензию, образованную частицами определяемого вещества в жидкой фазе. Анализаторы, измеряющие концентрацию по интенсивности света, прошедшего через слой дисперсной системы, называются турбидиметрами, а по интенсивности рассеянного дисперсной системой света — нефелометрами.

На рис. 87, *a* приведена схема турбидиметра, а на рис. 87, *б* — схема нефелометра. В состав обоих анализаторов входит источник света 1, кювета 2, через которую пропускают анализируемый раствор, и фоторезистор 3, сопротивление которого измеряется мостовой схемой 4. Измеряя величину ослабленного





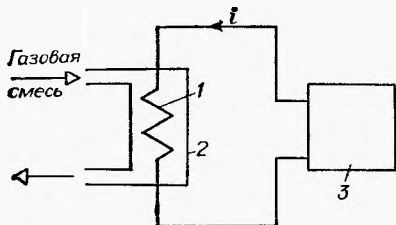


Рис. 88. Термокондуктометрический газоанализатор:

1 — терморезистор; 2 — камера; 3 — мост.

(в турбидиметре) или рассеянного (в нефелометре) светового потока можно судить о концентрации измеряемого вещества.

Колориметрические анализаторы применяют для измерения концентрации твердых частиц в технологических растворах (пульпы, эмульсии, взвеси), а также для анализа качества воды в системах водоподготовки и водоочистки (мутномеры).

**Анализаторы газов.** Действие термокондуктометрических газоанализаторов основано на зависимости между теплопроводностью газовой смеси и концентрацией в ней анализируемого компонента. Теплопроводность смеси измеряют с помощью терморезистора 1, помещенного в камеру 2 (рис. 88). Через терморезистор пропускают ток  $i$ , который его нагревает. Температура терморезистора определяется теплопроводностью газовой смеси, пропускаемой через камеру. Чем больше ее теплопроводность, тем лучше отводится тепло от терморезистора и тем меньше его температура и, следовательно, сопротивление.

Таким образом, работа термокондуктометрического газоанализатора подчиняется следующей закономерности: изменение концентрации анализируемого компонента приводит к изменению теплопроводности газовой смеси и вслед за этим — температуры и сопротивления терморезистора 1. Сопротивление терморезистора измеряют мостовой схемой 3.

Термокондуктометрические газоанализаторы применяют для определения водорода, аргона, гелия, азота, хлороводорода и других газов в технологических смесях различного состава.

В термохимических газоанализаторах концентрация определяемого компонента газовой смеси измеряется по количеству тепла, выделившегося при химической реакции — каталитическом окислении. В качестве катализаторов обычно используют нагретую платиновую нить, помещенную в камеру, через которую пропускают газовую смесь. Температура и, следовательно, сопротивление нити будут изменяться при изменении количества тепла, которое, в свою очередь, будет зависеть от концентрации определяемого компонента. Чем она больше, тем больше выделяется тепла в ходе реакции, тем выше температура нити.

Датчик термохимического газоанализатора аналогичен по устройству датчику термокондуктометрического газоанализатора (см. рис. 88). Температуру нити измеряют также мостовой схемой по ее сопротивлению.

Термохимические газоанализаторы, как правило, используют для определения и сигнализации наличия в воздухе закрытых

Рис. 89. Термомагнитный газоанализатор:

а — вид сбоку; б — вид сверху;  
1 — камера; 2 — магнитная система; 3 —  
терморезистор; 4 — мост.

производственных помещений дозврывоопасных концентраций горючих газов, паров и их смесей: ацетона, бензина, спиртов, эфиров и т. п. Обычно сигнализатор автоматически включает аварийный сигнал, когда концентрация газа в контролируемом воздухе достигает 20 % нижнего концентрационного предела воспламенения.

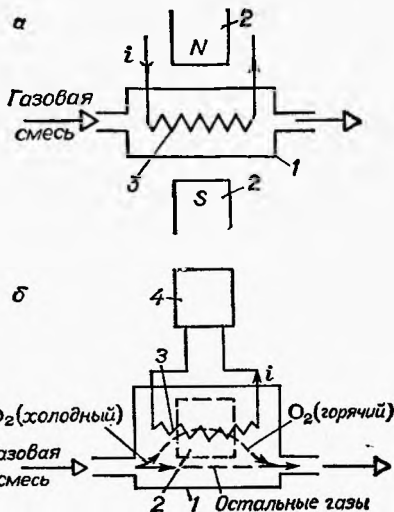
Из всех газов только кислород обладает магнитными свойствами, т. е. способностью намагничиваться под действием внешнего магнитного поля. При нагревании кислорода эта способность существенно уменьшается. Эти две особенности кислорода использованы в термомагнитных газоанализаторах.

В таких газоанализаторах газовую смесь подают в камеру 1 (рис. 89), которая расположена между полюсными наконечниками магнитной системы 2, создающими в камере неоднородное магнитное поле. В месте его максимального значения (под серединами полюсных наконечников) помещен терморезистор 3, разогреваемый током  $i$ . Если в газовой смеси содержится кислород, его молекулы под действием магнитного поля движутся к середине полюсных наконечников. Там они нагреваются терморезистором и теряют свои магнитные свойства. Холодные молекулы кислорода, непрерывно поступающие в камеру 1 с газовой смесью, вытесняют нагретые молекулы из магнитного поля.

Таким образом, в камере 1 образуются два газовых потока: кислорода, обдувающего терморезистор, и остальных газов, не реагирующих на наличие магнитного поля. При увеличении концентрации кислорода увеличивается интенсивность обдува терморезистора. Это приведет к уменьшению его температуры и сопротивления, которое измеряется мостовой схемой 4.

Термомагнитные газоанализаторы применяют только для измерения содержания кислорода в бинарных и многокомпонентных смесях.

Действие абсорбционных газоанализаторов основано на способности газов избирательно поглощать часть проходящего через них электромагнитного излучения. Такие газы, как водород, оксид и диоксид углерода, аммиак, метан поглощают



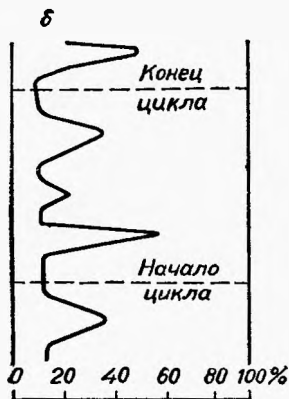
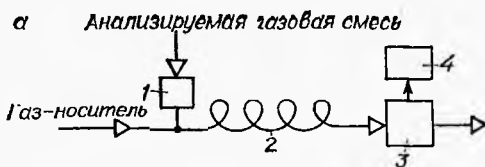


Рис. 90. Хроматографический газоанализатор:  
 а — схема; б — хроматограмма;  
 1 — дозатор; 2 — разделительная колонка; 3 —  
 детектор; 4 — измерительный прибор.

инфракрасное излучение, а хлор, озон, пары ртути — ультрафиолетовое. Поэтому, в зависимости от вида анализируемого компонента, в таких газоанализаторах используют инфракрасное или ультрафиолетовое излучение.

Принципиальная схема абсорбционного газоанализатора аналогична приведенной на рис. 80 для абсорбционного влагомера жидкости.

В газоанализаторах, работающих в инфракрасной области спектра, в качестве излучателей используют проволочные спирали, нагретые до 700—800 °С. Приемником в таких газоанализаторах служит герметичная камера, в которой давление газа (обычно это определяемый компонент газовой смеси) зависит от энергии потока  $\Phi_2$  и измеряется манометром. В газоанализаторах, работающих в ультрафиолетовой области спектра, источником излучения служит газоразрядная лампа, а приемником — фоторезистор.

Абсорбционные газоанализаторы ОА, ГИП, ГУП и другие применяют для измерения концентрации перечисленных выше газов в производстве метана, аммиака, бутадиена и др.

Все рассмотренные типы газоанализаторов позволяют определять концентрацию только одного компонента газовой смеси. В отличие от них хроматографические газоанализаторы (хроматографы) способны производить полный анализ газовой смеси, т. е. определять концентрации всех газов, составляющих эту смесь.

Процесс измерения в хроматографе (рис. 90, а) происходит в две стадии: сначала смесь разделяется на отдельные компоненты, а затем измеряется содержание каждого компонента смеси. Разделение газовой смеси происходит в разделительной колонке 2. Колонка представляет собой тонкую трубку, заполненную сорбентом — веществом, способным захватывать и удерживать на своей поверхности газы. Отмеренную дозатором 1

порцию анализируемой газовой смеси периодически подают в непрерывный поток вспомогательного газа, называемого газом-носителем. При продувании через колонку порция смеси разделяется на составляющие ее компоненты. Разделение происходит из-за различной сорбируемости газов. Чем она выше, тем труднее газу-носителю отрывать молекулы газа от поверхности сорбента. Поэтому газ-носитель, непрерывно поступаая в колонку, вытесняет из нее компоненты поочередно: сначала наиболее слабо сорбируемый компонент смеси, затем — остальные. Таким образом, из колонки выходит фактически бинарная смесь, один из компонентов которой газ-носитель, другой — компонент анализируемой смеси.

Бинарные смеси анализируются детектором 3. Один из наиболее распространенных типов детекторов — термокондуктометрический газоанализатор (см. рис. 88). Выходной сигнал детектора подают на регистрирующий прибор 4. На рис. 90,б представлена запись на ленточной диаграмме результатов анализа трехкомпонентной смеси. Время появления пиков после начала цикла определяет вид газа, а площадь пика, отнесенная к суммарной площади всех пиков, — его концентрацию в смеси.

Промышленные хроматографы снабжены устройствами для автоматической обработки выходного сигнала детектора с целью определения концентрации одного или суммы нескольких компонентов смеси.

### Контрольные вопросы

1. Требуют ли газоанализаторы предварительной градуировки?
2. Можно ли э. д. с. датчика рН-метра измерить автоматическим потенциометром типа КСП?
3. В чем принцип работы оптических анализаторов?
4. В чем разница между турбидиметром и нефелометром?
5. Можно ли рефрактометром анализировать непрозрачные жидкости?
6. Какие физические явления используются в термомагнитном газоанализаторе? в термокондуктометрическом газоанализаторе?
7. Зависят ли показания термокондуктометрического, термохимического и термомагнитного газоанализаторов от расхода газовой смеси через камеру датчика? от температуры газовой смеси?
8. Какие свойства кислорода используются в термомагнитном газоанализаторе?
9. Зависят ли показания абсорбционного газоанализатора от расхода газовой смеси? от температуры газовой смеси?
10. В чем принципиальное отличие хроматографического газоанализатора от остальных?
11. Могут ли хроматографические газоанализаторы обеспечить непрерывное измерение состава газовой смеси?

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### § 23. СВОЙСТВА ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Объект регулирования является элементом АСР, и свойства всей системы во многом определяются свойствами объекта. Изучение свойств промышленных объектов регулирования — важный и часто основной этап разработки АСР. Действительно, как отмечалось, объект регулирования, в отличие от остальных элементов АСР, является заранее заданным элементом, свойства которого определяют его назначением в технологическом процессе. Поэтому создание АСР сводится к подбору остальных элементов с такими свойствами, чтобы свойства всей системы обеспечивали требуемую точность стабилизации регулируемого параметра. Ясно, что это невозможно без знания свойств объекта регулирования.

С позиций теории регулирования объект, как и любой другой элемент АСР, рассматривают как устройство, преобразующее по определенному закону свои входные сигналы в выходные. Состояние объекта в каждый момент времени определяется его выходными сигналами (регулируемыми параметрами). Зависимость этих параметров от входных, т. е. характер преобразования сигналов, и обуславливает свойства объекта.

Другие свойства объектов, характеризующие их физическую природу, конструкцию, условия эксплуатации, находящуюся в них среду и т. п., как указывалось, несущественны для процессов регулирования. Поэтому часто самым различным по своей природе объектам присущи одинаковые зависимости выходных сигналов от входных. Примером может служить уже отмечавшаяся аналогия между электрическими элементами — резисторами и конденсаторами — и элементами пневмоавтоматики — пневморезисторами (дросселями) и пневмоемкостями (камерами).

Как было показано в § 2 и 3, при управлении технологическими процессами их разбивают на элементарные объекты регулирования, как правило, с одним регулируемым и одним регулирующим параметрами. Управление такими объектами осуществляется одноконтурными АСР. Поэтому здесь будут рассматриваться свойства только объектов регулирования с одним выходным сигналом (регулируемым параметром).

Принято различать статические и динамические свойства объектов регулирования. *Статические свойства* объекта — это его свойства в установившемся состоянии (в статике), т. е. при неизменяющихся входном и выходном сигналах. При этом зависимость установившегося значения выходного сигнала от входного называется *статической характеристикой* объекта,

В качестве примера рассмотрим статическую характеристику емкости  $1$  с притоком и потреблением жидкости, выходным сигналом которой является уровень (рис. 91, *а*). На линии потребления установлен клапан  $2$  с постоянным проходным сечением, а после клапана происходит свободный слив жидкости. В этом случае расход на потреблении  $v$  уже не является входным сигналом объекта, как для емкости на рис. 1, так как он не может изменяться произвольно, а зависит от уровня в емкости  $x$ , т. е. от выходного сигнала. Из гидравлики известно, что эта зависимость имеет вид:

$$v = k \sqrt{x}, \quad (37)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от пропускной способности клапана.

Таким образом, в данном примере объект имеет один входной сигнал — расход на притоке  $u$ , и один выходной — уровень в емкости  $x$  (рис. 91, *б*). В состоянии равновесия объекта приток и потребление должны быть одинаковы и постоянны. Следовательно, заменяя в формуле (37)  $v$  на  $u$  и решая это уравнение относительно  $x$ , получим зависимость установившегося значения уровня  $x$  от постоянного расхода на притоке  $u$ , т. е. статическую характеристику объекта:

$$x = u^2/k^2. \quad (38)$$

Эта статическая характеристика приведена на рис. 91, *в*.

Как отмечалось, в реальных условиях любой объект регулирования подвержен воздействию случайных возмущений и поэтому всегда находится в неустановившемся состоянии. Следовательно, статическая характеристика объекта регулирования не может полностью характеризовать его поведение в реальных условиях. С помощью этой характеристики можно определить лишь статическую ошибку АСР. Поведение же объекта

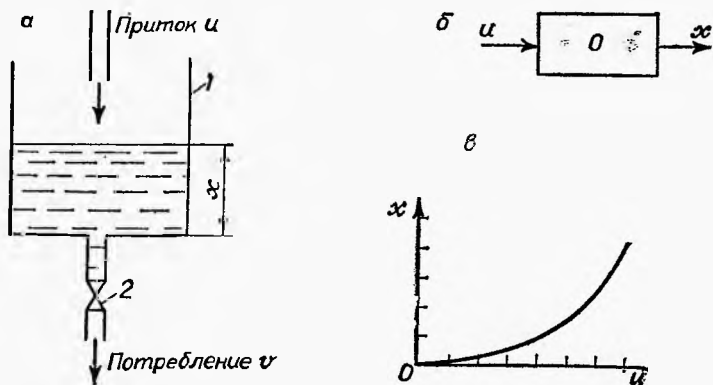


Рис. 91. Емкость как объект регулирования:

*а* — схема; *б* — структурная схема; *в* — статическая характеристика;  
 $1$  — емкость;  $2$  — клапан,

в неустановившемся состоянии (в динамике) зависит от его *динамических свойств*.

Динамические свойства объекта проявляются только при изменении его входных сигналов. При этом и выходной сигнал будет изменяться во времени. Причем в зависимости от характера изменения входных сигналов выходной сигнал одного и того же объекта может изменяться по-разному. Поэтому для характеристики динамических свойств объекта нельзя построить зависимость выходного параметра от входного, аналогичную статической характеристике.

Для выявления динамических свойств объекта регулирования необходимо узнать его реакцию на какой-либо определенный вид входного воздействия. Чтобы можно было сравнивать динамические свойства различных объектов, применяют одинаковые стандартизованные входные воздействия. Наиболее распространены следующие два вида стандартных воздействий:

скачкообразные, когда входной сигнал изменяют мгновенно, скачком на определенную величину, а затем поддерживают постоянным (рис. 92, а);

импульсные, когда входной сигнал изменяют на очень большую величину в течение очень короткого промежутка времени, а затем возвращают к прежнему значению; такая форма воздействия имеет вид импульса (рис. 92, б).

До подачи стандартного воздействия объект должен находиться в состоянии равновесия, т. е. его входной и выходной сигналы должны быть постоянными во времени.

Зависимость выходного сигнала объекта от времени, начиная с момента подачи стандартного воздействия, называется *динамической характеристикой* или *переходным процессом*. Графики типичных переходных процессов  $x(t)$  в промышленных объектах регулирования при скачкообразном входном воздействии приведены на рис. 93, где через  $x$  обозначен выходной сигнал, а через  $t$  — время.

Рассмотрим для примера переходный процесс в емкости с притоком и потреблением жидкости (см. рис. 92). До подачи стандартного воздействия по расходу на притоке объект находится в состоянии равновесия: приток и потребление одинаковы.

Увеличим расход на притоке  $u$  скачком (рис. 93, а). Тогда в емкости начнется накопление жидкости и уровень  $x$  в ней будет возрастать. Скорость роста уровня, очевидно, зависит от разности расходов на притоке и потреблении  $u - v$ , и она тем больше, чем больше эта разность. С другой стороны, с ростом уровня в емкости сразу же начнется и увеличение расхода  $v$  через клапан в соответствии с формулой (37). Следовательно, разность расходов на притоке и потреблении будет уменьшаться, а рост уровня замедляться. Увеличение уровня прекратится совсем, когда потребление снова сравняется с притоком и тем самым будет достигнуто новое состояние равновесия объекта.

Описанный переходный процесс  $x(t)$  показан на рис. 93, б.

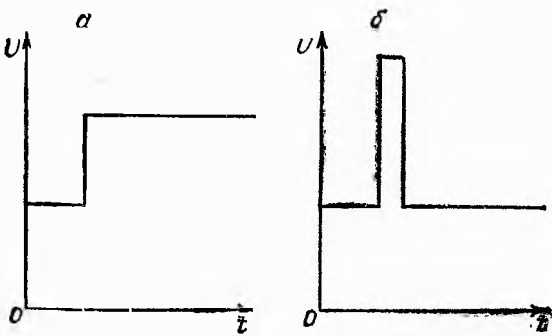


Рис. 92. Графики стандартных воздействий:  
 а — скачкообразное воздействие; б — импульсное воздействие.

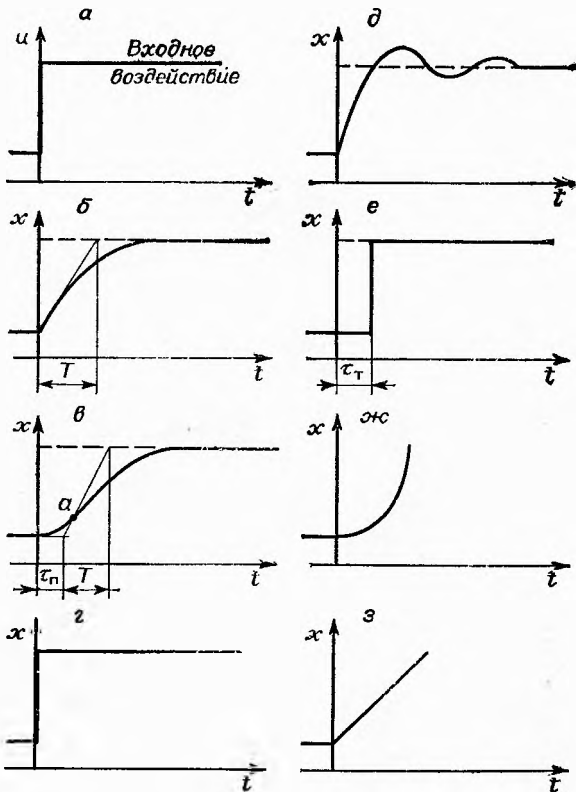


Рис. 93. Типичные переходные процессы в объектах регулирования при скачкообразном входном воздействии:

а — изменение входного сигнала; б—з — изменение выходного сигнала для различных объектов: б, в — инерционных, г — безынерционного; д — колебательного; е — объекта с запаздыванием; ж — неустойчивого; з — нейтрального.



Если объект регулирования имеет несколько входных сигналов (регулирующий и возмущающие параметры), то переходные процессы в нем при подаче стандартного воздействия по каждому входному сигналу могут быть различными. В этом случае различают воздействия, поданные по каналу регулирования (изменяется регулируемый параметр) или по каналу возмущения (изменяется возмущающий параметр). Наибольший интерес представляет переходный процесс в объекте по каналу регулирования, так как именно через этот канал осуществляется прямая связь в АСР (см. рис. 5).

При изучении переходных процессов необходимо принимать во внимание, что всегда существуют реальные возмущающие воздействия, вызывающие случайные колебания выходного сигнала объекта. Чтобы четко выявить переходный процесс на фоне случайных колебаний, стандартные воздействия, очевидно, должны быть значительно более сильными, чем случайные возмущающие воздействия на объект. Именно по этой причине стандартные воздействия имеют вид скачка или импульса, т. е. мгновенно, а значит, и наиболее резко изменяются входные сигналы. Величину скачкообразного или импульсного воздействия выбирают такой, чтобы, с одной стороны, получить заметный переходный процесс, а с другой — не допустить возникновения аварийного технологического режима.

Переходные процессы являются универсальным средством изучения динамических свойств объектов. Чтобы понять как в переходном процессе проявляются динамические свойства объекта и как их можно установить по виду процесса, рассмотрим типичные динамические свойства объектов и соответствующие им переходные процессы.

Почти все промышленные объекты обладают *инерцией*. Инерция объектов регулирования проявляется в том, что при мгновенном изменении их входного сигнала выходной сигнал изменяется не мгновенно, а постепенно. Изменение выходного сигнала продолжается и после прекращения входного воздействия, т. е. когда входной сигнал уже не изменяется. Такое явление называется *последствием*. Примеры графиков переходных процессов для инерционных объектов показаны на рис. 93, б, в.

Инерция присуща объектам и протекающим в них процессам самой различной природы. Например, при внезапном выключении двигателя автомобиль продолжает двигаться по инерции. Это пример механической инерции. При включении или выключении электроплитка нагревается или остывает постепенно. Это пример тепловой инерции. Постепенное изменение уровня в емкости после скачкообразного или импульсного изменения притока жидкости — проявление гидродинамической инерции.

Инерция свойственна не только объектам регулирования, но и другим элементам АСР. Однако у некоторых объектов

инерция может быть пренебрежимо малой в сравнении с остальными элементами АСР и не оказывает заметного влияния на процесс регулирования. Такие объекты называют *безынерционными*. В идеальном безынерционном объекте выходной сигнал изменяется синхронно с входным без всякого последствия, как показано на рис. 93, г.

Инерция реальных объектов регулирования вызвана наличием в них запаса вещества или энергии. Чем больше этот запас, тем сильнее проявляется инерция объекта. Так, в рассмотренных примерах инерция автомобиля была обусловлена его массой, инерция электроплитки — запасаемым в ней теплом (тепловой энергией), инерция емкости — запасом жидкости в ней. Способность объекта накапливать вещество или энергию называется *емкостью* и является количественной мерой инерции.

При переходных процессах в инерционных объектах запас вещества или энергии в них может изменяться как монотонно (только увеличиваться или только уменьшаться), так и колебательно. Например, груз, подвешенный на пружине, при отклонении его от положения равновесия начинает колебаться. Такой же колебательный характер имеет величина тока в электрическом колебательном контуре.

Общим для этих примеров является колебательный характер выходных сигналов объектов — положения груза и тока в электрическом контуре. Объекты, обладающие таким свойством, называются *колебательными*. В отличие от них объекты с монотонным изменением выходных сигналов называются *апериодическими* (неколебательными).

Примеры переходных процессов в апериодических объектах регулирования приведены на рис. 93, б, в, в колебательном объекте — на рис. 93, д.

Еще одним важным свойством реальных объектов является *запаздывание*. Оно проявляется в том, что реакция объекта на входное воздействие, т. е. изменение его выходного сигнала, запаздывает по отношению к изменению входного сигнала. Пример безынерционного объекта с запаздыванием — транспортер для сыпучих материалов. Входным сигналом такого объекта является изменение расхода материала на входе, а выходным — изменение расхода материала на выходе транспортерной ленты. При скачкообразном изменении расхода на входе расход материала на выходе транспортера изменится также скачком, но не сразу, а лишь тогда, когда это скачкообразное изменение дойдет до конца транспортера. График переходного процесса в таком безынерционном объекте с запаздыванием приведен на рис. 93, е.

Мы рассматривали объекты регулирования, в которых переходные процессы заканчиваются установившимся значением выходного сигнала (пунктирная линия на рис. 93, б—е). Такие объекты под влиянием входного воздействия переходят из одного состояния равновесия в другое (отсюда и название

процесса — переходный). Эти объекты регулирования получили название *устойчивых*. Все рассмотренные выше переходные процессы присущи устойчивым объектам.

Устойчивые объекты регулирования обладают одним общим свойством — *самовыравниванием*, т. е. способностью переходить из одного установившегося состояния в другое по окончании переходного процесса при скачкообразном входном воздействии. Чем меньше изменяется выходной сигнал в переходном процессе при одном и том же скачкообразном входном воздействии, тем больше степень самовыравнивания объекта.

Существуют устойчивые объекты с очень большим самовыравниванием, когда выходной сигнал после переходного процесса почти не отличается от его начального значения. График статической характеристики таких объектов расположен почти горизонтально, т. е. в установившемся состоянии выходной сигнал очень слабо зависит от входного.

В химической технологии имеются объекты и с очень малым самовыравниванием, когда малейшее изменение входного сигнала вызывает значительное изменение выходного сигнала.

Устойчивость — широко распространенное в технике, но не обязательное свойство объектов: существуют и *неустойчивые объекты* регулирования. У таких объектов состояние равновесия существует, но оно неустойчиво, поэтому любое сколь угодно малое воздействие выводит неустойчивый объект из состояния равновесия, и с течением времени он все больше отклоняется от этого состояния. Переходный процесс в неустойчивом объекте показан на рис. 93, *ж*.

Неустойчивые объекты довольно редки в технике. Значительно чаще встречаются так называемые *нейтральные объекты*, занимающие промежуточное положение между устойчивыми и неустойчивыми.

Свойства нейтрального объекта рассмотрим сначала на примере. Нейтральный объект можно получить из рассмотренной выше емкости с притоком и потреблением жидкости, если расход на потреблении сделать независимым от уровня в емкости. Для этого достаточно, например, установить на линии потребления насос с постоянной производительностью (см. рис. 1). У такого объекта существует состояние равновесия: когда приток равен потреблению, уровень не изменяется. Однако, в отличие от устойчивого объекта (емкости с клапаном на линии потребления — см. рис. 91), равенство притока и потребления может соблюдаться при любом значении уровня. Иначе говоря, в состоянии равновесия объекта его выходной сигнал — уровень — может быть любым, независимо от расхода на притоке и потреблении, т. е. статической характеристики у такого объекта нет. Поэтому нейтральные объекты называют еще *астатическими*.

Приложим теперь скачкообразное воздействие к расходу на притоке, например увеличим его. Так как потребление не за-

висит от уровня в емкости, то разность между притоком и потреблением будет оставаться постоянной и, следовательно, уровень в емкости будет возрастать с постоянной скоростью, не стремясь ни к какому установившемуся значению. График такого переходного процесса приведен на рис. 93, з. Подобные свойства присущи всем нейтральным объектам. В частности, такие же свойства присущи интегратору (см. § 5). О нейтральных объектах можно сказать, что они не имеют самовыравнивания.

Проанализируем теперь, как рассмотренные динамические свойства объектов проявляются в соответствующих переходных процессах.

Наиболее широко распространенное свойство инерции промышленных объектов, как устойчивых, так нейтральных и неустойчивых, проявляется в переходном процессе в виде плавного без скачков изменения выходного сигнала (рис. 93, б, в, д, ж, з). Следствием такого поведения инерционного объекта является последствие, т. е. изменение выходного сигнала при уже не изменяющемся (после скачка) входном сигнале.

Количественно инерцию объекта можно было бы охарактеризовать скоростью изменения выходного сигнала в переходном процессе. Однако, как видно из рис. 93, эта скорость изменяется с течением времени, причем у одних объектов она максимальна в начальный момент времени (рис. 93, б), а у других — в некоторой точке  $a$  (рис. 93, в).

Определение максимальной скорости переходного процесса позволяет ввести понятие постоянной времени, которая и служит оценкой инерции объекта. *Постоянной времени  $T$*  объекта называется время, за которое его выходной сигнал  $x$  достиг бы установившегося значения в переходном процессе, если бы изменялся все время с максимальной скоростью. Как следует из определения, постоянная времени существует только у устойчивых объектов.

Постоянную времени можно найти по графику переходного процесса. Для этого следует провести касательную к этому графику в точке максимальной скорости. Тогда постоянную времени  $T$  находят, как показано на рис. 93, б, в. Такой способ обычно используется только для апериодических (неколебательных) объектов.

С точки зрения управления инерция объектов имеет как положительную, так и отрицательную стороны. Положительная заключается в том, что благодаря инерционности объект регулирования не успевает реагировать на кратковременные возмущающие воздействия, что облегчает стабилизацию его регулируемого параметра. С другой стороны, неизбежное при этом последствие затрудняет компенсацию возмущений в АСР по отклонению, что снижает качество стабилизации технологических параметров.

Свойство колебательности объектов играет только отрицательную роль в процессе регулирования. Вследствие колебательности выходной сигнал объекта изменяется в течение переходного процесса на большую величину, чем в апериодическом объекте. Это видно из сравнения графиков переходных процессов в апериодическом (рис. 93, б, в) и колебательном (рис. 93, д) объектах.

Запаздывание в объектах регулирования проявляется в сдвиге по времени начала переходного процесса относительно входного воздействия. Величина этого временного сдвига называется *временем запаздывания*, а само запаздывание — *чистым или транспортным*.

При транспортном запаздывании выходной сигнал  $x$  совсем не изменяется в течение всего времени запаздывания  $\tau_T$  (рис. 93, е). Однако эффект, похожий на запаздывание, наблюдается и в некоторых объектах без транспортного запаздывания, когда выходной сигнал  $x$  в переходном процессе сначала изменяется медленно (рис. 93, в). Такой эффект кажущегося запаздывания называется *переходным запаздыванием*. Время переходного запаздывания  $\tau_n$  можно найти по графику переходного процесса, как показано на рис. 93, в.

Запаздывание, в особенности транспортное, является наиболее неблагоприятным свойством объектов с точки зрения их регулирования. Действительно, в АСР с обратной связью рассогласование, вызываемое возмущающими воздействиями на объект с запаздыванием, проявляется лишь по истечении времени запаздывания. Поэтому и регулирующее воздействие в таких АСР запаздывает по отношению к возмущающим воздействиям. Получается, что регулятор в АСР реагирует не на текущее, а на прошлое возмущение, что, разумеется, затрудняет его компенсацию и приводит к ухудшению стабилизации регулируемого параметра. По этой же причине объекты, имеющие перереодное запаздывание, труднее поддаются регулированию.

Как правило, в объектах химической технологии запаздывание обычно сочетается с инерцией. Наиболее трудные для регулирования безынерционные объекты с транспортным запаздыванием встречаются редко.

Установлено, что для объектов с запаздыванием качество регулирования может быть лучше при меньшем отношении времени полного запаздывания  $\tau = \tau_n + \tau_T$  к постоянной времени  $T$  объекта. Отношение  $\tau/T$  минимально (равно нулю) для всех объектов без запаздывания и максимально (бесконечно велико) для безынерционных с запаздыванием, когда  $T = 0$ .

Устойчивые объекты легче поддаются управлению, чем неустойчивые. В самом деле, в любом устойчивом объекте отклонение регулируемого параметра под действием возмущения имеет вполне определенную, не бесконечную величину (рис. 93, б—е). Поэтому при достаточно большом самовыравнивании, когда возмущающие воздействия вызывают малые колебания

регулируемого параметра, можно обойтись без системы управления. В нейтральных же объектах, в особенности в неустойчивых, отклонение регулируемого параметра под действием возмущений с течением времени может стать сколь угодно большим. Поэтому управлять такими объектами, безусловно, необходимо.

Таким образом, самовыравнивание объекта способствует управлению им и поэтому иногда называется *саморегулированием*.

Степень самовыравнивания, как отмечалось, характеризует запас устойчивости объекта регулирования. Объекты с большим самовыравниванием имеют большой запас устойчивости и легко поддаются управлению. Объекты с нулевым самовыравниванием, т. е. нейтральные, не имеют запаса устойчивости (говорят, что они находятся на границе устойчивости). Неустойчивые же объекты обладают отрицательным самовыравниванием и им приписывают отрицательный запас устойчивости.

Следует иметь в виду, что степень самовыравнивания не полностью характеризует объект с точки зрения регулирования. Имеют значение и другие показатели, в частности отношение  $\tau/T$ . Так, для объекта с большим отношением  $\tau/T$  качество стабилизации его регулируемого параметра в АСР может быть низким даже при значительном самовыравнивании.

### Контрольные вопросы

1. Что называется статической характеристикой объекта регулирования? У каких объектов нет статической характеристики?
2. Что называется динамической характеристикой объекта и как ее получают?
3. Почему в качестве стандартных входных воздействий выбирают скачкообразное или импульсное изменение входного сигнала объекта?
4. Что понимают под переходным процессом в объекте? Как изменится переходный процесс в емкости с притоком и потреблением жидкости (рис. 91), если скачкообразное изменение расхода на притоке изменить на импульсное (рис. 92)?
5. Какой из переходных процессов, изображенных на рис. 93, наиболее подходит для ресивера как объекта регулирования в АСР давления, изображенной на рис. 6?
6. Чем отличаются переходные процессы в устойчивых, нейтральных и неустойчивых объектах?
7. Как по виду переходного процесса при скачкообразном воздействии можно оценить степень самовыравнивания объекта? Как можно выявить нейтральный объект?
8. Изменяется ли и в какую сторону инерция и постоянная времени бытового холодильника после заполнения его продуктами?

### § 24. КАЧЕСТВО РЕГУЛИРОВАНИЯ В АСР

Свойства объекта регулирования, как отмечалось, определяются его назначением в технологическом процессе и не всегда благоприятны для управления им. Поэтому задачей управления технологическим объектом можно считать изменение его

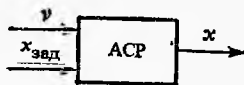


Рис. 94. АСР как скорректированный объект регулирования.

свойств для уменьшения чувствительности к возмущающим воздействиям.

С этой точки зрения АСР в целом можно рассматривать как объект, входными сигналами которого являются задание  $x_{\text{зад}}$  и возмущение  $u$ , а выходным сигналом — регулируемый параметр  $x$  (рис. 94). Этот объект, очевидно, должен обладать лучшими статическими и динамическими свойствами, чем сам объект регулирования.

Так же, как и для объектов регулирования, различают статические и динамические показатели АСР.

Основным статическим показателем АСР является *статическая ошибка*, т. е. рассогласование в установившемся состоянии АСР. Как уже известно, в астатической АСР статическая ошибка отсутствует. Поэтому можно утверждать, что астатический регулятор наилучшим образом корректирует статические свойства объекта.

Динамические показатели АСР проявляются только в неустановившемся состоянии. Поэтому их можно выявить по реакции АСР на стандартные воздействия по каналам задания  $x_{\text{зад}}$  или возмущения  $u$ , т. е. по переходным процессам в ней. Примеры переходных процессов в АСР — изменение рассогласования  $\Delta x$  при скачкообразном воздействии по каналу задания (на значение  $\Delta x_{\text{зад}}$ ) и каналу возмущения — приведены на рис. 95.

Какие свойства АСР являются идеальными с точки зрения качества стабилизации регулируемого параметра? Ясно, что в идеальной АСР любые возмущающие воздействия (в том числе и стандартные) не должны вызывать рассогласования. Это означает, что идеальная АСР должна быть нечувствительной к возмущениям. Отсюда следует, что в идеальной АСР статическая ошибка отсутствует, а переходный процесс таков, что площадь, заштрихованная на рис. 95, равна нулю.

Примеры АСР, близкие к идеальным, в измерительной технике уже приводились. Так, все промышленные промежуточные преобразователи и измерительные приборы построены в виде

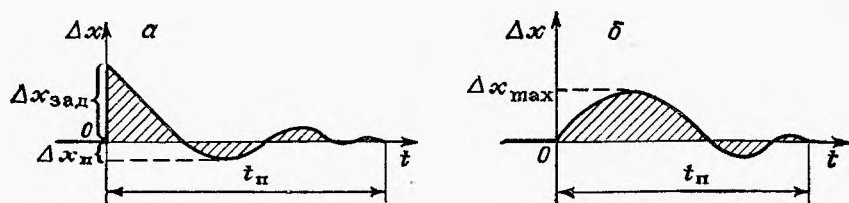


Рис. 95. Переходные процессы в АСР при скачкообразных входных воздействиях: а — по каналу задания; б — по каналу возмущения.

следящих систем с глубокой обратной связью. Объектами управления в этих системах являются не технологические объекты с заранее заданными свойствами и подверженные возмущающим воздействиям, а измерительные преобразователи с хорошими динамическими свойствами (безынерционные и без запаздывания) и почти не подверженные возмущающим воздействиям. Поэтому и качество измерительных следящих систем очень хорошее.

Идеальные переходные процессы в реальных АСР практически недостижимы. По отклонению переходного процесса в реальной АСР от идеального можно судить о качестве ее работы. Для количественной оценки качества работы АСР служат показатели качества регулирования (качества переходных процессов).

Одним из показателей качества регулирования в установившемся состоянии АСР является уже упоминавшаяся *статическая ошибка*.

Наиболее универсальный динамический показатель, характеризующий близость АСР к идеальной — абсолютное значение *площади переходного процесса* (на рис. 95, а эта площадь заштрихована). Наряду с абсолютной величиной площади переходного процесса часто используют такой показатель, как *квадрат этой площади* (при этом автоматически не учитывается знак отклонения). Оба эти показателя характеризуют одновременно и величину и длительность рассогласования в переходном процессе. Иногда по технологическим соображениям важнее длительность переходного процесса, в частности, когда требуется перевести объект управления в новое состояние за минимальное время (например, при аварийном сбросе давления в реакторе). В этом случае за показатель качества регулирования принимают *время переходного процесса*  $t_p$ .

В некоторых случаях главную роль играет величина рассогласования в переходном процессе. Тогда показателем качества регулирования считают максимальное рассогласование  $\Delta x_{\max}$ , называемое *динамической ошибкой*.

В промышленных условиях удобнее вводить стандартное воздействие  $\Delta x_{\text{зад}}$  по каналу задания (рис. 95, а). Такие переходные процессы характеризуются теми же показателями качества, за исключением динамической ошибки. Вместо нее вводят другой показатель — *перерегулирование*  $\Delta x_p$ , определяемый, как показано на рис. 95, а.

Указанные показатели качества, как нетрудно убедиться, равны нулю для идеальной АСР и больше нуля для любой реальной АСР. Поэтому чем эти показатели меньше, тем ближе АСР к идеальной.

Свойства любой АСР, а следовательно, и качество переходных процессов в ней зависят как от свойств объекта регулирования, так и от характеристик остальных элементов АСР. Поэтому, изменяя характеристики отдельных элементов АСР, в



частности регулятора, можно добиться наилучшего возможного в данных условиях качества переходного процесса (например, минимального времени переходного процесса). Такая АСР будет наилучшей из всех возможных для данного объекта регулирования и ее называют *оптимальной*.

Не следует смешивать понятия оптимальности и идеальности. Идеальная АСР, как указывалось, практически не достижима, а оптимальная — это наилучшее приближение к идеальной.

Разработка и построение оптимальных АСР обычно связаны со значительными трудностями, а сами эти АСР оказываются сложными и дорогими. Однако замечено, что даже большие отступления от оптимальной АСР обычно приводят к незначительному ухудшению качества регулирования. Такие отступления практически неизбежны, так как, во-первых, свойства промышленных объектов, как правило, известны лишь приближенно и изменяются с течением времени, во-вторых, при изготовлении регуляторов и других элементов АСР неизбежен разброс их параметров. Поэтому в большинстве случаев требуется настройка АСР на действующем объекте. С этой целью промышленные регуляторы снабжают органами регулировки, позволяющими изменять их настройку в достаточно широком диапазоне.

Настройка АСР на действующем объекте требует высокой квалификации. Регулируемый параметр АСР под действием случайных возмущений колеблется около своего задания. В этих условиях трудно проследить влияние параметров настройки регулятора на показатель качества и определить, в какую сторону и насколько следует их изменять.

Ясно, что чем меньше параметров настройки, тем проще процесс настройки АСР. Однако сложные современные АСР — комбинированные, многоконтурные — могут иметь достаточно много параметров настройки. В этом случае уже бессильны опыт и интуиция самого квалифицированного специалиста. Аналогичная картина наблюдается при ручном (неавтоматическом) управлении производственными процессами.

Простыми и достаточно медленно протекающими процессами вначале управлял человек. Затем по мере усложнения этих процессов и ужесточения требований к качеству управления автоматические системы вытеснили человека. Поэтому естественно дальнейшее стремление автоматизировать уже не только процесс управления, но и процесс настройки АСР. Это диктуется повышенными требованиями к качеству АСР и необходимостью сохранения ее оптимальности при изменяющихся свойствах объекта регулирования и характере внешних воздействий.

Системы, способные автоматически находить и поддерживать оптимальные значения параметров настройки, называются *самоадаптирующимися*. Такие системы содержат элементы (устройства), автоматически изменяющие параметры настрой-

ки в нужную сторону. Образно говоря, самонастраивающиеся АСР автоматически изучают свойства объекта и возмущающих воздействий и приспосабливаются к ним.

Вообще автоматические системы, обладающие способностью к самообучению (помимо основной их функции — управления), называются *самообучающимися* или *адаптивными*. Самонастраивающиеся АСР — лишь один из видов адаптивных систем. Другим частным случаем адаптивных систем являются так называемые *экстремальные*, которые не только стабилизируют регулируемый параметр около его задания, но и автоматически выбирают задание, наилучшее (оптимальное) для всего технологического процесса.

### Контрольные вопросы

1. Какой вид имеет статическая характеристика по каналу задания (зависимость регулируемого параметра от его задания) для астатической АСР?
2. Какой вид имеет динамическая характеристика идеальной АСР по каналу задания? по каналу возмущения?
3. Какие показатели качества регулирования в АСР Вы знаете? Как изменяются эти показатели для АСР температуры смеси в реакторе, описанной в § 6, при переходе от статического регулятора температуры к астатическому?
4. Когда применяют самонастраивающиеся АСР?

### § 25. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ В АСР

При неизменных свойствах объекта качество регулирования в АСР зависит от свойств остальных ее элементов, в первую очередь регулятора. Свойства регулятора определяются характером преобразования его входного сигнала  $\Delta x$  в выходной  $z$  (см. рис. 5).

Так, для АСР уровня в емкости (см. рис. 3) регулятором является рычаг 2. При изменении уровня в емкости, например, при его увеличении, поплавок 1 поднимается и поворачивает рычаг 2, который через шток 3 прикрывает клапан 4, уменьшая приток жидкости в емкость. В этой АСР исполнительный механизм отсутствует и выходной сигнал регулятора  $z$  одновременно является входным сигналом регулирующего органа — степенью открытия клапана  $\mu$  (см. рис. 4). В этом регуляторе перемещение штока пропорционально перемещению поплавка. Следовательно, выходной сигнал этого регулятора пропорционален входному — отклонению уровня от заданного значения.

Рассмотрим теперь АСР давления воздуха в ресивере (см. рис. 6). Здесь регулятором является шток 4. При изменении давления воздуха в ресивере, например, при его увеличении, усилие на мембране 5 станет больше веса груза 3, и шток пойдет вверх. В результате клапан 2 будет уменьшать приток воздуха в ресивер. Так как вес груза неизменный, то шток будет двигаться вверх все время, пока усилие на мембране больше веса груза, т. е. пока есть рассогласование между измеренным

и заданным давлениями. Результирующая сила на штоке является входным сигналом регулятора, а степень открытия клапана — его выходным сигналом. Здесь выходной сигнал регулятора уже не пропорционален входному, так как шток непрерывно перемещается, пока усилие на нем не станет равным нулю.

Существуют регуляторы, имеющие и другие зависимости выходного сигнала от входного.

Характер зависимости выходного сигнала регулятора от входного, т. е. закон, по которому его входной сигнал преобразуется в выходной, называется *законом регулирования*.

Как известно, несмотря на большое разнообразие объектов регулирования, характерные их свойства, имеющие существенное значение для целей управления, немногочисленны, как и сами способы управления объектами. Это объясняется общностью физических законов, которым подчиняются различные процессы, протекающие в объектах и системах регулирования.

Практика показала, что подобная универсальность присуща и законам регулирования для самых различных технологических объектов. Используя весьма небольшое число типовых законов регулирования, можно достаточно качественно управлять почти всеми промышленными объектами. При этом для каждого объекта достаточно подобрать лишь параметры настройки регулятора. Применение таких типовых законов регулирования позволяет использовать в промышленных АСР стандартные, серийно выпускаемые регуляторы, что имеет неоспоримые достоинства.

Однако в отдельных случаях (для трудно регулируемых объектов, при повышенных требованиях к качеству АСР, при сильно изменяющихся свойствах объектов и т. п.) типовые законы регулирования оказываются недостаточно эффективными и приходится прибегать к более сложным законам.

Свойства регулятора с тем или иным законом регулирования проявляются, как и свойства объектов регулирования и АСР, в реакции на скачкообразное входное воздействие  $\Delta x$ , показанное на рис. 96, а. Рассмотрим типовые законы регулирования и области их применения.

Наиболее простым и широко распространенным является такой закон регулирования, при котором выходной сигнал регулятора  $z$  линейно зависит от входного  $\Delta x$ :

$$z = z_0 + k \Delta x, \quad (39)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом передачи регулятора*, а  $z_0$  — постоянная составляющая сигнала  $z$ .

Как видно из формулы (39),  $z_0$  — это такое значение выходного сигнала регулятора, при котором рассогласование  $\Delta x$  на его входе равно нулю.

Закон регулирования, выраженный формулой (39), называется *пропорциональным*. Сокращенно говорят, что это П-за-

Рис. 96. Переходные процессы в регуляторах при скачкообразном входном воздействии:

$a$  — входное воздействие;  $b$  — П-регулятор;  $в$  — ПД-регулятор;  $г$  — ПИ-регулятор;  $д$  — ПИД-регулятор.

кон регулирования, а сам регулятор с таким законом регулирования называют пропорциональным или П-регулятором.

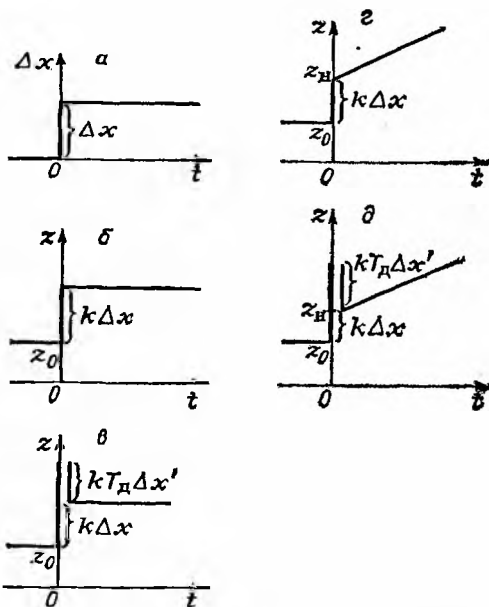
Этот закон действует, например, при регулировании уровня в емкости (см. рис. 3 и 4), где регулирующее воздействие — степень открытия клапана — пропорционально перемещению поплавка, т. е. отклонению уровня в емкости от его задания.

Переходный процесс в П-регуляторе — изменение его выходного сигнала  $z$  при скачкообразном изменении входного сигнала  $\Delta x$  — приведен на рис. 96, б.

Как видно из формулы (39), в П-регуляторе имеется два настроечных параметра: величина постоянной составляющей  $z_0$  и коэффициент передачи регулятора  $k$ .

В регуляторе уровня роль постоянной  $z_0$  играет длина штока 3, так как ею определяется степень открытия клапана  $z$  при отсутствии рассогласования, т. е. при  $\Delta x = 0$ . Коэффициентом передачи регулятора  $k$  является отношение плеч рычага 2 от поплавка до оси поворота и от штока до этой оси. Действительно, при изменении одного из плеч рычага, например, удалении поплавка от оси поворота, отклонению уровня от заданного значения будет соответствовать меньшее перемещение клапана, т. е.  $k$  уменьшится.

Почти всем промышленным объектам в той или иной мере присуще запаздывание, особенно переходное. Запаздывание ухудшает качество регулирования в АСР с обратной связью. Физически это можно объяснить тем, что возмущающее воздействие на объект с запаздыванием не сразу сказывается в рассогласовании; следовательно, регулятор реагирует на возмущающее воздействие также с запаздыванием. В результате и регулирующее воздействие запаздывает по отношению к вызвавшему его возмущающему воздействию. Таким образом, регулирующее воздействие по П-закону как бы оказывается несвоевременным и неспособным поэтому эффективно скомпенсировать действие возмущений.



С увеличением глубины обратной связи (ростом  $k$ ) регулирующее воздействие увеличивается и его несвоевременность проявляется все сильнее, что в конце концов вызовет неустойчивость АСР. Поэтому для объектов со значительным запаздыванием не удастся получить требуемое качество регулирования. Этот недостаток П-закона регулирования сужает область его применения.

Можно усовершенствовать П-закон регулирования, если в нем учитывать тенденцию изменения рассогласования в будущем. Для этого можно использовать скорость изменения рассогласования  $\Delta x'$ . Такой регулятор будет иметь способность к *предварению*, т. е. он будет реагировать на рассогласование с опережением по времени (см. § 4). Предварение — явление противоположное запаздыванию и поэтому может его скомпенсировать.

Закон регулирования в регуляторе с предварением включает в себя еще одно слагаемое, пропорциональное скорости изменения рассогласования  $\Delta x'$ :

$$z = z_0 + k(\Delta x + T_d \Delta x'), \quad (40)$$

где  $T_d$  — постоянный коэффициент.

В математике нахождение скорости изменения некоторой переменной величины называется дифференцированием. Поэтому такой закон регулирования — *пропорционально-дифференциальный* (сокращенно: ПД-закон регулирования и ПД-регулятор). Слагаемое  $k\Delta x$  называется пропорциональной или П-составляющей, а слагаемое  $kT_d\Delta x'$  — дифференциальной или Д-составляющей. Коэффициент  $T_d$  в дифференциальной составляющей всегда положителен и имеет размерность времени. Поэтому он получил название *времени дифференцирования* или *времени предварения*.

Если рассогласование  $\Delta x$  не изменяется, то его скорость  $\Delta x'$ , очевидно, равна нулю и, как видно из сравнения формул (39) и (40), в этом частном случае ПД-закон регулирования действует так же, как П-закон. Следовательно, действие Д-составляющей проявляется лишь в неустановившемся состоянии АСР, пока рассогласование  $\Delta x$  изменяется во времени.

В ПД-регуляторе в сравнении с П-регулятором добавляется еще один настроечный параметр — время предварения  $T_d$ .

Переходный процесс в ПД-регуляторе показан на рис. 96, в.

Из сравнения графиков ПД-закона регулирования и П-закона видно, что первый характеризуется наличием импульса (теоретически бесконечно малой длительности и большой величины), возникающего в момент скачка рассогласования. Появление этого импульса объясняется тем, что скорость  $\Delta x'$  в момент скачка рассогласования бесконечно велика. Поэтому слагаемое  $kT_d\Delta x'$  в формуле (40), а значит, и выходной сигнал регулятора  $z$  в этот момент достигают очень больших значений.

Чтобы нагляднее увидеть эффект предварения в ПД-регуляторе, рассмотрим его реакцию не на скачкообразное, а на постепенное изменение рассогласования с постоянной скоростью (рис. 97). Пунктиром на этом графике показана П-составляющая закона регулирования, изменение которой подобно изменению рассогласования. Дифференциальная составляющая увеличивает выходной сигнал регулятора  $z$  в течение всего времени, пока увеличивается рассогласование. Чем быстрее изменяется рассогласование, тем больше увеличение выходного сигнала ПД-регулятора по сравнению с П-регулятором. Понятно, что в случае уменьшения рассогласования выходной сигнал регулятора уменьшался бы. Такое форсированное изменение выходного сигнала ПД-регулятора позволяет эффективнее компенсировать действие возмущений на объекты с запаздыванием.

Итак, ПД-закон регулирования расширяет область применения П-закона на объекты со значительным запаздыванием. При этом следует иметь в виду, что дифференцирование рассогласования не является идеальным его предварением и поэтому не может полностью устранить вредное влияние запаздывания сигнала в контуре обратной связи АСР. В особенности это касается транспортного запаздывания, когда входное воздействие в течение всего времени запаздывания никак не проявляется в рассогласовании  $\Delta x$ , а следовательно, и в скорости его изменения  $\Delta x'$ . Может оказаться, что для таких объектов не только ПД-, но и никакой другой закон регулирования не обеспечит требуемого качества АСР. Это тот случай, когда обратная связь как способ регулирования по отклонению оказывается бессильной. Выход из положения — применение дополнительного регулирующего воздействия по возмущению, т. е. комбинированной АСР.

П- и ПД-законы регулирования являются статическими: установившееся рассогласование (статическая ошибка) в АСР с П- и ПД-регулятором не равно нулю. На это уже обращалось внимание в § 5 в примере регулирования уровня в емкости.

Дальнейшее совершенствование П- и ПД-регуляторов заключается в придании им свойства астатизма, т. е. способности устранять с течением времени статическую ошибку АСР. При-

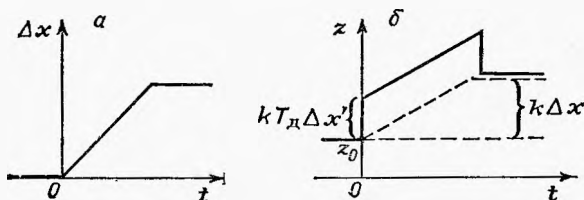


Рис. 97. Переходный процесс в ПД-регуляторе при постепенном изменении входного воздействия:

$a$  — входное воздействие;  $b$  — переходный процесс,

мером такого регулятора может служить регулятор давления воздуха в ресивере.

В § 5 было объяснено, что астатизм регулятора проявляется в том, что его выходной сигнал  $z$  непрерывно и неограниченно изменяется все время, пока существует ненулевой входной сигнал  $\Delta x$ . В рассмотренных выше законах регулирования [формулы (39) и (40)] астатизм можно обеспечить только за счет составляющей  $z_0$ , которая уже не должна быть постоянной. Для этого достаточно изменять ее со скоростью, пропорциональной рассогласованию, т. е.

$$z'_0 = (k/T_n) \Delta x, \quad (41)$$

где  $z'_0$  — скорость изменения величины  $z_0$ ;  $k/T_n$  — коэффициент пропорциональности, в котором  $k$  — коэффициент передачи регулятора;  $T_n$  — постоянный коэффициент.

Как видно из этой формулы, при отсутствии рассогласования скорость  $z'_0$  равна нулю и, следовательно, величина  $z_0$  не изменяется. При наличии рассогласования скорость  $z'_0$  не равна нулю и, значит, величина  $z_0$  непрерывно изменяется.

По известной скорости  $z'_0$  можно восстановить и саму величину  $z_0$ , подобно тому, как, например, зная скорость движения тела, можно найти пройденный им путь. Операция отыскания переменной величины по известной скорости ее изменения обратна операции дифференцирования и называется интегрированием. Величина  $T_n$ , имеющая размерность времени, называется *временем интегрирования*.

Итак, если в П-законе регулирования значение  $z_0$  вычислять из формулы (41), то получим астатический закон регулирования:

$$\left. \begin{aligned} z &= z_0 + k \Delta x; \\ z'_0 &= (k/T_n) \Delta x. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Такой закон регулирования называется *пропорционально-интегральным* (сокращенно ПИ-закон регулирования и, соответственно, ПИ-регулятор). Здесь переменная величина  $z_0$  является интегральной составляющей закона регулирования (И-составляющей).

Аналогично, если в ПД-законе регулирования значение  $z_0$  вычислять из формулы (41), то получим также астатический *пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования* (сокращенно ПИД-закон регулирования и, соответственно, ПИД-регулятор):

$$\left. \begin{aligned} z &= z_0 + k (\Delta x + T_d \Delta x'), \\ z'_0 &= (k/T_n) \Delta x. \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Графики переходных процессов в ПИ- и ПИД-регуляторах приведены на рис. 96, *г, д*.

Рис. 98. График двухпозиционного закона регулирования.

В результате введения И-составляющей величина  $z_0$  перестает быть параметром настройки ПИ- и ПИД-регуляторов. Вместо нее в этих регуляторах появляется новый параметр настройки — время интегрирования  $T_{и}$ .

Итак, типовые законы регулирования (П, ПД, ПИ и ПИД) состоят из П-, Д- и И-составляющих, каждая из которых по своему связана с входным сигналом регулятора  $\Delta x$ . ПИД-закон включает все три составляющие. При  $T_{д} = 0$  он превращается в ПИ-, а при бесконечно большом  $T_{и}$  — в ПД-закон. Если одновременно  $T_{д} = 0$  и  $T_{и}$  бесконечно велико, то ПИД-закон превращается в П-закон регулирования.

Возможен и чисто *интегральный закон регулирования* (И-закон), состоящий из одной И-составляющей:

$$z' = (k/T_{и}) \Delta x, \quad (44)$$

где  $z'$  — скорость изменения выходного сигнала регулятора.

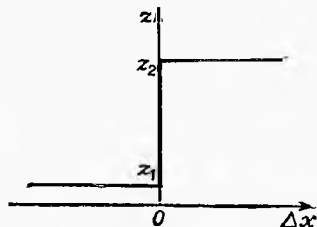
И-закон регулирования (И-регулятор) является астатическим и применяется обычно для регулирования объектов со слабо выраженными динамическими свойствами (малые запаздывание и инерция). В отличие от него ПИ-закон регулирования, также астатический, называют еще *изодромным*.

Рассмотренные типовые законы регулирования характеризуются непрерывной зависимостью выходного сигнала регулятора  $z$  от рассогласования  $\Delta x$ : любое сколь угодно малое изменение  $\Delta x$  вызывает изменение  $z$ . Однако применяемые на практике законы регулирования не только непрерывные. Существуют и дискретные законы регулирования, в частности *релейные*, где выходной сигнал регулятора  $z$  имеет лишь одно из двух возможных значений:  $z_1$  или  $z_2$ . Следовательно, и регулирующий орган может находиться в одном из двух положений: открыто (включено) — закрыто (выключено). Такой закон регулирования называется также *двухпозиционным*, и для него зависимость выходного сигнала от входного имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} z &= z_1 \text{ при } \Delta x < 0; \\ z &= z_2 \text{ при } \Delta x > 0. \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Зависимость (45) представлена графически на рис. 98. Из него видно, что при изменении знака рассогласования  $\Delta x$  выходной сигнал регулятора  $z$  в релейном законе регулирования изменяется скачком от одного возможного значения до другого, а регулирующий орган, соответственно, переключается из одного положения в другое.

Релейные регуляторы обычно конструктивно проще непрерывных, и их применяют, когда не предъявляются высокие





требования к качеству управления. Примером двухпозиционного релейного регулятора может служить регулятор температуры в электрическом утюге. Этот регулятор включает нагревательную спираль, когда температура утюга ниже заданной, и выключает ее, когда температура становится выше заданной. Здесь входной сигнал регулятора  $\Delta x$  — отклонение регулируемой температуры от заданной, а выходной  $z$  — состояние спирали:  $z_1$  — спираль включена (при  $\Delta x < 0$ ),  $z_2$  — выключена (при  $\Delta x > 0$ ).

### Контрольные вопросы

1. Что называется законом регулирования?
2. Какими параметрами определяется П-закон регулирования? Как по графику переходного процесса в П-регуляторе определить его параметры настройки?
3. Для каких объектов П-закон регулирования может оказаться непригодным?
4. Как можно усовершенствовать П-регулятор для объектов с запаздыванием и как называется такой регулятор?
5. Что такое интегральная составляющая закона регулирования и как она получается? Как проявляется действие И-составляющей в переходном процессе в ПИ- и ПИД-регуляторах?
6. Повысится ли точность регулирования температуры в электрическом утюге, если релейный регулятор в нем заменить на непрерывный?

### § 26. НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ В АСР

Как уже отмечалось в § 24, промышленные АСР обычно нуждаются в настройке для достижения требуемого качества регулирования. С этой целью в серийных регуляторах предусмотрены органы настройки, позволяющие изменять в широком диапазоне параметры типовых законов регулирования: коэффициент передачи  $k$ , время интегрирования  $T_{\text{и}}$  и время предвращения  $T_{\text{д}}$ .

Обычно для определения параметров настройки регулятора в АСР создают стандартные воздействия и наблюдают переходные процессы, так как по виду переходного процесса можно судить о качестве регулирования. Рассмотрим влияние параметров настройки регулятора на вид и показатели качества переходных процессов в АСР (рис. 99).

Для определенности примем, что скачкообразное стандартное воздействие величиной  $\Delta x_{\text{зад}}$  приложено по каналу задания. Вначале проследим влияние коэффициента передачи регулятора  $k$  при отсутствии И- и Д-составляющих в законе регулирования (П-регулятор). С увеличением коэффициента передачи увеличивается глубина обратной связи в АСР и переходный процесс, вначале аperiodический (неколебательный) и растянутый во времени (рис. 99, а), постепенно уменьшается (рис. 99, б) и затем переходит в затухающий колебательный (рис. 99, в). При дальнейшем увеличении коэффициента передачи колебательный переходный процесс начинает растягивать-

ся во времени (рис. 99, з) и наконец превращается в незатухающие колебания (рис. 99, д).

Возникновение незатухающих колебаний свидетельствует о достижении границы устойчивости замкнутой системы. Устойчивость АСР описана в § 6. Эти колебания, возникающие при определенной глубине обратной связи, генерирует сама замкнутая система, и поэтому они существуют независимо от внешних воздействий.

Колебания регулируемого параметра в технологическом процессе обычно нежелательны, и чем быстрее они затухают, тем лучше качество регулирования. Поэтому вводят дополнительный показатель качества регулирования — *степень затухания колебательного переходного процесса*, который характеризует скорость уменьшения амплитуды колебаний (см. пунктирную линию на рис. 99, з). Для апериодического переходного процесса, в котором колебания отсутствуют, степень затухания максимальна (рис. 99, а, б), а для незатухающих колебаний, возникающих при работе АСР на границе устойчивости, — равна нулю (рис. 99, д).

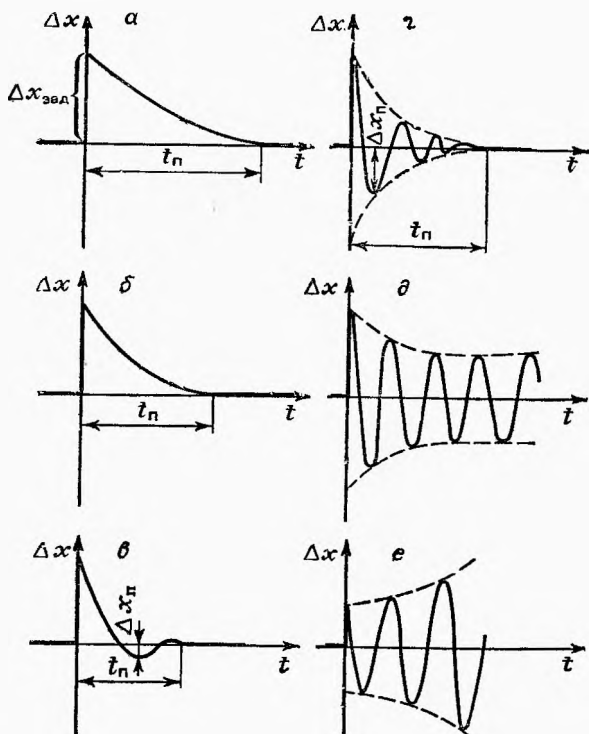


Рис. 99. Переходные процессы в замкнутой АСР при изменении параметра настройки регулятора.

Дальнейшее увеличение коэффициента передачи регулятора выводит АСР за границу устойчивости, что проявляется в самопроизвольном нарастании амплитуды колебаний (рис. 99, *е*). При этом все показатели качества регулирования теряют смысл.

Таким образом, для нормальной работы АСР прежде всего необходимо обеспечить ее устойчивость, и только после этого можно говорить о качестве переходных процессов.

Как видно из переходных процессов на рис. 99, с ростом коэффициента передачи регулятора площадь и время переходного процесса  $t_n$  сначала уменьшаются, а затем увеличиваются и при работе АСР на границе устойчивости становятся бесконечно большими.

Степень затухания колебательного переходного процесса все время уменьшается, вплоть до возникновения незатухающих колебаний. Перерегулирование  $\Delta x_n$  сначала равно нулю (рис. 99, *а, б*), а затем увеличивается и приближается к величине  $\Delta x_{зад}$ .

Лучшее качество регулирования достигается, как правило, при работе АСР вблизи границы устойчивости. Однако следует иметь в виду, что АСР с П-регулятором имеет статическую ошибку, которая может оказаться недопустимо большой даже вблизи границы устойчивости, т. е. при максимально возможном коэффициенте передачи П-регулятора.

Рассмотрим теперь влияние И-составляющей закона регулирования на качество переходных процессов в АСР. Уменьшение времени интегрирования  $T_n$  в ПИ-регуляторе, как и увеличение коэффициента передачи, приводит к увеличению глубины обратной связи. При этом вид переходных процессов и показатели их качества изменяются примерно так же, как и при увеличении коэффициента передачи (в последовательности на рис. 99, *а — д*). При введении И-составляющей статическая ошибка исчезает, но при этом затухающие колебания возникают раньше. В результате этого граница устойчивости АСР достигается при меньших значениях коэффициента передачи, чем при отсутствии И-составляющей. Поэтому говорят, что введение И-составляющей уменьшает запас устойчивости системы.

Таким образом, оказывается, что увеличению глубины обратной связи в АСР (увеличению коэффициента передачи и уменьшению времени интегрирования) с целью улучшения качества регулирования препятствует возникновение неустойчивости в замкнутой системе регулирования. Поэтому для объектов регулирования с неблагоприятными динамическими свойствами часто не удается обеспечить требуемое качество регулирования при использовании регуляторов, имеющих только П- и И-составляющие.

Увеличить степень затухания колебаний в переходном процессе при неизменных параметрах настройки и П- и И-составляющих позволяет введение Д-составляющей. Иначе говоря,

введение Д-составляющей в закон регулирования как бы отодвигает границу устойчивости АСР и увеличивает запас ее устойчивости. Поэтому для управления объектами с неблагоприятными динамическими свойствами применяют ПИД-регуляторы.

При настройке регулятора АСР стандартные воздействия по каналу задания создают скачкообразным изменением сигнала задания, а по каналу возмущения — скачкообразным перемещением регулирующего органа. При этом величина стандартного воздействия, с одной стороны, должна быть достаточно большой, чтобы переходный процесс четко выделялся на фоне случайных колебаний регулируемого параметра, а с другой — достаточно малой, чтобы не вызвать недопустимых нарушений технологического регламента. Эти противоречивые требования затрудняют настройку АСР по переходным процессам в промышленных условиях и требуют от наладчика определенных навыков и квалификации.

### Контрольные вопросы

1. Как изменится степень затухания колебательного переходного процесса в АСР при увеличении коэффициента передачи регулятора?
2. Почему после настройки времени интегрирования необходимо подстроить коэффициент передачи?
3. От чего зависит коэффициент передачи П-регулятора АСР уровня в емкости на рис. 3? Как можно его изменить?
4. К чему приводит увеличение времени предварения ПД-регулятора? Можно ли увеличивать его беспредельно?
5. Можно ли настроить регулятор по переходному процессу в АСР при импульсном воздействии?

### § 27. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

В гл. I приводились примеры простейших регуляторов — уровня в емкости и давления в ресивере. Такие регуляторы не потребляют энергию от внешнего источника и называются поэтому *регуляторами прямого действия*. Регуляторы прямого действия просты по конструкции, но, как правило, не позволяют получить требуемый закон регулирования и достаточную мощность выходного сигнала для перемещения регулирующего органа. Поэтому современные промышленные регуляторы являются *регуляторами непрямого действия*, и для их работы необходим источник энергии.

Промышленные регуляторы используются для формирования типовых законов регулирования (П, И, ПИ, ПД и ПИД) и усиления мощности выходного сигнала. Кроме того, регуляторы обычно выполняют функции сумматоров. Раньше промышленность выпускала много различных типов регуляторов с не унифицированными входными сигналами, предназначенных для регулирования отдельных технологических параметров, причем

часто регуляторы совмещали с измерительными приборами (приборные регуляторы).

В настоящее время широко производят и применяют регуляторы с унифицированными сигналами, созданные по блочному принципу, т. е. состоящие из типовых блоков. Достоинства блочного принципа и унификации очевидны и были продемонстрированы на примере средств измерительной техники (см. гл. IV).

Каждый блок регулятора состоит из модулей — конструктивных взаимозаменяемых узлов, выполняющих определенные функции (например, модуль усилителя, модуль динамики, модуль питания и т. п.). По выполняемым операциям регулятор можно также расчленить на отдельные элементы, каждый из которых осуществляет одну из элементарных операций: алгебраическое суммирование сигналов, их усиление, формирование отдельных составляющих закона регулирования и др.

Такое функциональное расчленение регулятора может и не совпадать с его конструктивным делением на блоки и модули. Однако выявление типовых функциональных элементов и их взаимосвязи облегчает понимание принципа действия и конструкции любого промышленного регулятора.

Рассмотрим основные функциональные элементы регуляторов и способы их конструктивного решения.

**Суммирующие элементы (сумматоры).** В замкнутой одноконтурной АСР сумматор  $C$  (см. рис. 5) выполняет операцию вычитания (алгебраического суммирования) двух сигналов:

$$\Delta x = x_{\text{зад}} - x_{\text{н}}. \quad (46)$$

Здесь задание  $x_{\text{зад}}$  и измеренное значение регулируемого параметра  $x_{\text{н}}$  — входные сигналы сумматора  $C$ , а рассогласование  $\Delta x$  — его выходной сигнал. В общем случае, например, в многоконтурных АСР, может потребоваться алгебраическое суммирование нескольких сигналов:

$$\Delta x = \pm x_{\text{вх}_1} \pm x_{\text{вх}_2} \pm \dots, \quad (47)$$

где  $x_{\text{вх}_1}, x_{\text{вх}_2}, \dots$  — входные сигналы сумматора;  $\Delta x$  — его выходной сигнал.

Электрические сигналы — постоянные и переменные напряжения и токи — обычно алгебраически суммируют непосредственно на входе усилителей или преобразователей. Поэтому электрические суммирующие элементы конструктивно не выделяют за исключением тех случаев, когда требуется электрически разделить (развязать) входные сигналы между собой. Тогда алгебраическое суммирование переменных напряжений проводят с помощью трансформатора, а постоянных напряжений и токов — с помощью магнитного усилителя (магнитный усилитель одновременно и усиливает результирующий сигнал). Входные напряжения или токи подают на отдельные входные обмотки трансформатора или магнитного усилителя. Все об-

мотки изолированы друг от друга, чем и достигается гальваническая развязка электрических сигналов.

Суммирование напряжений переменного тока необходимо, например, при работе регулятора с измерительными преобразователями трансформаторного типа, а постоянных напряжений или токов — при работе с термопарами или промежуточными преобразователями с токовым выходом.

**Усилители сигналов.** Мощность выходного сигнала регулятора иногда недостаточна для воздействия на привод регулирующего органа, и поэтому ее необходимо усиливать. Усиление сигналов применяется и при формировании законов регулирования. Под усилением сигнала понимается увеличение его мощности за счет энергии постороннего источника. При этом выходной сигнал усилителя  $x_{\text{вых}}$  пропорционален входному сигналу  $x_{\text{вх}}$ :

$$x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}, \quad (48)$$

где коэффициент пропорциональности  $k$  является коэффициентом усиления.

Таким образом, усилитель — элемент с линейной характеристикой. Однако в реальных усилителях диапазон изменения выходного сигнала  $x_{\text{вых}}$  всегда ограничен некоторой максимальной величиной  $x_{\text{мах}}$ . При изменении входного сигнала  $x_{\text{вх}}$  выходной сигнал  $x_{\text{вых}}$  пропорционален входному, лишь пока он меньше величины  $x_{\text{мах}}$ . При дальнейшем увеличении входного сигнала выходной остается постоянным и равным  $x_{\text{мах}}$ . Описанный эффект ограничения сигнала в реальных усилителях называется *насыщением*. Таким образом, характеристика реального усилителя с насыщением, как видно из рис. 100, нелинейна.

Мощность выходного сигнала любого усилителя всегда больше мощности его входного сигнала. Величина же выходного сигнала  $x_{\text{вых}}$  (напряжение или ток) может быть как больше, так и меньше входного сигнала  $x_{\text{вх}}$ .

Усилители электрических сигналов весьма разнообразны по назначению, принципу действия и устройству. Общим для них является то, что любой усилитель электрических сигналов имеет входную и выходную цепи и упрощенно может быть представлен, как показано на рис. 101. Входное напряжение  $U_{\text{вх}}$  приложено к входной

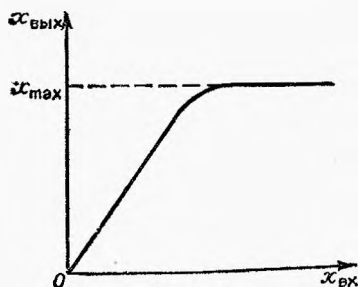


Рис. 100. Характеристика реального усилителя с насыщением

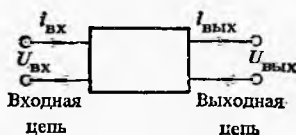


Рис. 101. Упрощенная схема усилителя электрических сигналов.

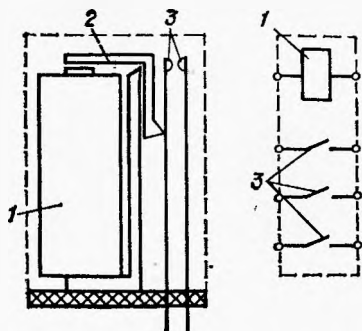


Рис. 102. Электромагнитное реле:  
*а* — устройство; *б* — электрическая схема.  
*1* — обмотка реле; *2* — якорь; *3* — контакты.

цепи усилителя, по которой протекает входной ток  $i_{вх}$ . В выходной цепи действует выходное напряжение  $U_{вых}$  и при подключении нагрузки по ней протекает выходной ток  $i_{вых}$ .

**Реле.** Релейные элементы, или просто реле, предназначены для преобразования непрерывного входного сигнала в дискретный выходной. Выходной сигнал реле  $x_{вых}$  может принимать одно из двух возможных значений —  $x_1$  или  $x_2$  в зависимости от отклонения входного сигнала  $x_{вх}$  от заданной величины  $x_0$ :

$$\left. \begin{aligned} x_{вых} &= x_1 & \text{при } x_{вх} < x_0; \\ x_{вых} &= x_2 & \text{при } x_{вх} > x_0. \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

Как видно из этой формулы, выходной сигнал реле изменяется скачком от  $x_1$  до  $x_2$  или, наоборот, от  $x_2$  до  $x_1$  при прохождении входного сигнала через значение  $x_0$ , т. е. при изменении знака разности  $x_{вх} - x_0$ .

Такая зависимость выходного сигнала от входного имеет место в релейном законе регулирования, где скачок выходного сигнала  $z$  происходит при нулевом входном сигнале  $\Delta x$  — см. формулу (45). Характеристика реле нелинейна и по виду совпадает с графиком на рис. 98, если  $z$  принять за выходной сигнал  $x_{вых}$ , а  $\Delta x$  — за разность  $x_{вх} - x_0$ . Сравнивая характеристики реле (см. рис. 98) и усилителя с насыщением (см. рис. 100), можно сделать вывод, что реле действует так же, как усилитель с насыщением, имеющий бесконечно большой коэффициент усиления.

Реле применяют для получения релейного закона регулирования, для управления электродвигателями исполнительных механизмов, а также для различных дистанционных переключений в технологических схемах и схемах автоматизации.

Простейшее реле для коммутации электрических сигналов — электромагнитное (рис. 102), которое представляет собой электромагнит с притягивающимся к нему якорем. Якорь *2* механически связан с контактами реле *3* таким образом, что при прохождении тока через обмотку *1* реле якорь притягивается, замыкая при этом одни контакты и размыкая другие, а при выключении тока и отпуске якоря — наоборот. Электрическая схема электромагнитного реле приведена на рис. 102, б. Входным сигналом электромагнитного реле является ток, проходящий через его обмотку.

Ток, при котором реле срабатывает (ток срабатывания), играет роль  $x_0$  в формуле (49). За выходной сигнал прини-

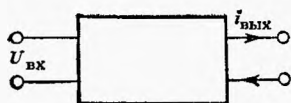


Рис. 103. Упрощенная схема бесконтактного ключа.

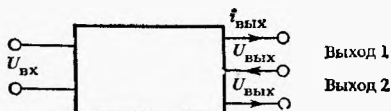


Рис. 104. Упрощенная схема триггера.

мается состояние контактов реле, например выключенному состоянию соответствует  $x_{\text{вых}} = 0$ , а включенному —  $x_{\text{вых}} = 1$ .

Электромагнитные реле просты по конструкции, но малонадежны и имеют ограниченный срок службы из-за износа контактов, поэтому в настоящее время они все более заменяются бесконтактными — электронными и полупроводниковыми ключами и триггерами.

Бесконтактный электронный или полупроводниковый ключ (рис. 103) представляет собой устройство, пропускающее или не пропускающее через себя ток  $i_{\text{вых}}$  в зависимости от величины приложенного к нему управляющего напряжения  $U_{\text{вх}}$ . Входным сигналом такого бесконтактного ключа является управляющее напряжение  $U_{\text{вх}}$ , а выходным — состояние ключа. Тогда по формуле (49) выключенному ключу соответствует  $x_{\text{вых}} = 0$ , а включенному —  $x_{\text{вых}} = 1$ .

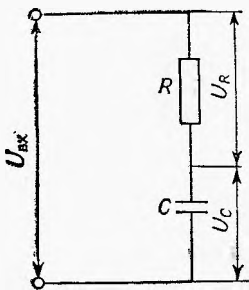
Триггер (рис. 104) — это устройство, имеющее две выходные цепи (два выхода) и два устойчивых состояния. Входной сигнал триггера  $U_{\text{вх}}$  имеет вид импульсов напряжения. После каждого импульса триггер переходит из одного устойчивого состояния в другое. Под устойчивым состоянием триггера понимают наличие напряжения  $U_{\text{вых}}$  или тока  $i_{\text{вых}}$  на одном из выходов и отсутствие на другом. Например, в формуле (49) можно считать, что  $x_{\text{вых}} = 1$  при наличии напряжения  $U_{\text{вых}}$  или тока  $i_{\text{вых}}$  на выходе 1 и отсутствии на выходе 2. И, наоборот,  $x_{\text{вых}} = 0$  при напряжении или токе на выходе 2 и отсутствии на выходе 1.

**Динамические элементы.** Рассмотренные элементы регуляторов являются практически статическими, т. е. безынерционными и без запаздывания. Иначе говоря, выходные сигналы этих элементов изменяются синхронно с входными. Поэтому из одних только статических элементов невозможно построить регулятор с Д- и И-составляющими в законе регулирования. Для формирования этих составляющих необходимы динамические элементы — дифференцирующие и интегрирующие, выполняющие соответственно операции дифференцирования и интегрирования сигналов.

Как указывалось в § 25, скорость изменения  $x'_{\text{вых}}$  выходного сигнала  $x_{\text{вых}}$  интегрирующего элемента должна быть пропорциональна его входному сигналу:

$$x'_{\text{вых}} = \frac{1}{T_{\text{И}}} x_{\text{вх}} \quad (50)$$



Рис. 105. Электрическая  $RC$ -цепь.

где  $x_{вх}$  — входной сигнал интегрирующего элемента; коэффициент пропорциональности  $T_{и}$  — время интегрирования.

Для дифференцирующего элемента, наоборот, выходной сигнал должен быть пропорционален скорости изменения его входного сигнала:

$$x_{вых} = T_{д} x'_{вх} \quad (51)$$

где коэффициент пропорциональности  $T_{д}$  — время дифференцирования.

В электротехнике не существует идеальных интегрирующих и дифференцирующих элементов, выполняющих операции (50) и (51) абсолютно точно. Однако комбинация реальных динамических элементов с усилителями с помощью прямых и обратных связей позволяет получить требуемый характер преобразования сигнала.

Динамическое преобразование электрических сигналов может осуществляться электрической цепью (рис. 105), состоящей из последовательно соединенных резистора с сопротивлением  $R$  и конденсатора с емкостью  $C$ . Такая цепь называется  $RC$ -цепью. Выходной сигнал  $RC$ -цепи — напряжение на резисторе  $U_R$  или напряжение на конденсаторе  $U_C$ .

Напряжение на конденсаторе связано с входным напряжением  $RC$ -цепи  $U_{вх}$  соотношением:

$$RCU'_C + U_C = U_{вх} \quad (52)$$

Напряжение на резисторе связано с входным напряжением  $RC$ -цепи соотношением:

$$RCU'_R + U_R = RCU'_{вх} \quad (53)$$

Произведение  $RC$ , фигурирующее в формулах (52) и (53), называется постоянной времени  $RC$ -цепи  $T$ . Таким образом, если за выходное напряжение  $RC$ -цепи  $U_{вых}$  принять напряжение на конденсаторе  $U_C$ , то из формулы (52) получим:

$$TU'_{вых} + U_{вых} = U_{вх} \quad (54)$$

Если за выходное напряжение принять напряжение на резисторе  $U_R$ , то из формулы (53) получим:

$$TU'_{вых} + U_{вых} = TU'_{вх} \quad (55)$$

Сравнивая полученные уравнения  $RC$ -цепи (54) и (55) с уравнениями идеальных интегрирующего и дифференцирующего элементов (50) и (51), видим, что в уравнениях (54) и (55) имеются «лишние» члены. А именно: уравнение (54) без члена  $U_{вых}$  равносильно уравнению (50) (при  $T = T_{и}$ ), а уравнение (55) без

члена  $TU'_{\text{вых}}$  — уравнению (51) (при  $T = T_d$ ). Вследствие такой аналогии  $RC$ -цепь с выходным напряжением, снимаемым с конденсатора, — уравнение (54) — называют интегрирующей, а с выходным напряжением, снимаемым с резистора, — уравнение (55) — дифференцирующей.

### Контрольные вопросы

1. Каковы преимущества регуляторов непрямого действия перед регуляторами прямого действия?
2. Приведите примеры сумматоров сигналов в измерительных преобразователях и приборах.
3. Может ли усилитель работать без постороннего источника энергии?
4. Что такое насыщение усилителя и почему оно возникает?
5. Что является выходным сигналом реле? триггера?
6. В чем разница между ключом и триггером?
7. Какие математические операции реализуют динамические элементы регуляторов?
8. Можно ли  $RC$ -цепь использовать одновременно как интегрирующую и дифференцирующую?

### § 28. ЭЛЕМЕНТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Элементы пневматических регуляторов предназначены для выполнения операций с пневматическими сигналами: алгебраического суммирования, усиления и т. д. Однако непосредственно с пневматическими сигналами можно производить лишь немногие операции.

Поэтому в подавляющем большинстве пневматических устройств входные пневматические сигналы предварительно преобразуют в механические — силу и перемещение, а после выполнения необходимых операций — снова в пневматические. Преобразование входного давления в силу и перемещение производится в основном мембранами, а перемещения в выходное давление — соплом с заслонкой.

К числу наиболее распространенных функциональных элементов пневматических устройств относятся повторители, реле, сумматоры, усилители мощности, задатчики и выключающие реле.

**Повторитель давления** (рис. 106). Состоит из мембраны 1 и делителя давления, образованного постоянным дросселем 3 и переменным дросселем типа сопло-заслонка. Роль заслонки для сопла 2 выполняет жесткий центр мембраны.

В таком повторителе входное давление  $p_{\text{вх}}$  преобразуется мембраной 1 в пропорциональное ему усилие, направленное вниз. Это усилие уравнивается направленным вверх усилием, создаваемым выходным давлением  $p_{\text{вых}}$ . В состоянии равновесия эти силы равны. Поэтому по формуле (21) будут равны и создающие их давления.

Любое изменение входного давления  $p_{\text{вх}}$  приведет к нарушению равновесия сил на мембране и к ее перемещению относительно сопла 2, что повлечет изменение выходного давления

$p_{\text{вых}}$ , которое будет изменяться до тех пор, пока снова не сравняется с входным  $p_{\text{вх}}$ . Таким образом, выходное давление будет повторять любые изменения входного.

По виду выходного сигнала все функциональные элементы пневматических устройств можно разделить на две группы: дискретные и непрерывные. В дискретных функциональных элементах выходной сигнал  $p_{\text{вых}}$  имеет только два значения. Одно из них — минимальное — соответствует атмосферному давлению, т. е.  $p_{\text{вых}} = 0$ . Другое — максимальное — соответствует давлению питания, т. е.  $p_{\text{вых}} = p_{\text{пит}}$ . В непрерывных функциональных элементах выходной сигнал может принимать любое значение в стандартном диапазоне, т. е. от  $0,2 \cdot 10^5$  до  $1,0 \cdot 10^5$  Па.

**Двух- и четырехходовые элементы.** Они лежат в основе большинства функциональных элементов пневматических устройств. Функции, выполняемые двух- и четырехходовыми элементами, определяются характером пневматических связей между их камерами.

Двухходовый элемент предназначен для выполнения различных операций с одним или двумя пневматическими сигналами. На рис. 107 показана конструкция, а на рис. 108 приведены схемы различных вариантов включения двухходового элемента. В этих схемах использованы общепринятые в пневматике условные изображения: сопел (в виде стрелок), подвода давления питания (верхние камеры на рис. 108) и соединения с атмосферой (нижние камеры на рис. 108).

Двухходовый элемент представляет собой устройство с мембранным блоком и двумя дросселями типа сопло-заслонка. Заслонками для сопел 1 и 5 (см. рис. 107) служат жесткие центры одинаковых по площади мембран 2 и 4. Эти мембраны, а также мембрана 3 большей площади связаны штоком 6 в единый мембранный блок.

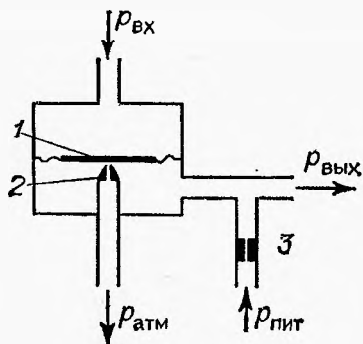


Рис. 106. Повторитель давления:  
1 — мембрана; 2 — сопло; 3 — постоянный дроссель.

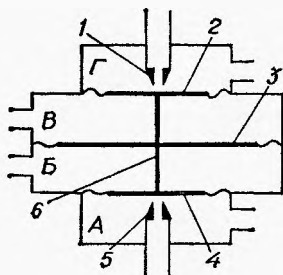


Рис. 107. Двухходовый элемент:  
1, 5 — сопла; 2, 3, 4 — мембраны; 6 — шток; А, Б, В, Г — камеры.

Мембраны делят двухходовый элемент на четыре камеры: две глухие (*Б* и *В*) и две проточные (*А* и *Г*). Давления в этих камерах создают усилия, действующие вдоль оси штока. Если результирующее усилие на штоке направлено вверх, мембранный блок закрывает сопло *1* и открывает сопло *5*. Если результирующее усилие направлено вниз, то, наоборот, сопло *1* открыто, а сопло *5* закрыто.

Если в одной из глухих камер элемента поддерживать постоянное давление  $p_{\text{под}}$ , называемое давлением подпора (на схемах такая камера заштриховывается), а проточные камеры соединить между собой, то двухходовый элемент будет выполнять операцию сравнения входного сигнала  $p_{\text{вх}}$  с постоянным давлением  $p_{\text{под}}$  (рис. 108, *а*). При таком включении давления в проточных камерах всегда одинаковы и поэтому положение мембранного блока зависит только от соотношения давлений  $p_{\text{вх}}$  и  $p_{\text{под}}$ . Если входное давление  $p_{\text{вх}}$  меньше давления подпора  $p_{\text{под}}$ , то их разность  $\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{под}}$  будет меньше нуля и мембранный блок окажется в верхнем положении. При этом верхнее сопло закроется, а нижнее — откроется, и, следовательно, выходное давление  $p_{\text{вых}}$  станет равным атмосферному (0). Если же разность  $\Delta p$  больше нуля, то мембранный блок закроет нижнее сопло и откроет верхнее. При этом выходное давление станет равным давлению питания  $p_{\text{пит}}$ .

Статическая характеристика при такой схеме включения двухходового элемента имеет дискретный характер:

$$\left. \begin{aligned} p_{\text{вых}} &= p_{\text{атм}} && \text{при } \Delta p < 0; \\ p_{\text{вых}} &= p_{\text{пит}} && \text{при } \Delta p > 0. \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

При непрерывном изменении входного сигнала элемент работает следующим образом. Пока входное давление  $p_{\text{вх}}$  меньше давления подпора  $p_{\text{под}}$ , выходное давление  $p_{\text{вых}}$  остается неизменным и равным атмосферному (0). Как только входное давление превысит давление подпора, выходное давление скачком возрастет до давления питания  $p_{\text{пит}}$  и при дальнейшем увеличении входного давления будет оставаться постоянным.

Такая дискретная зависимость, при которой выходной сигнал может принимать лишь одно из двух возможных значений и скачкообразно переходит от одного значения к другому при не-

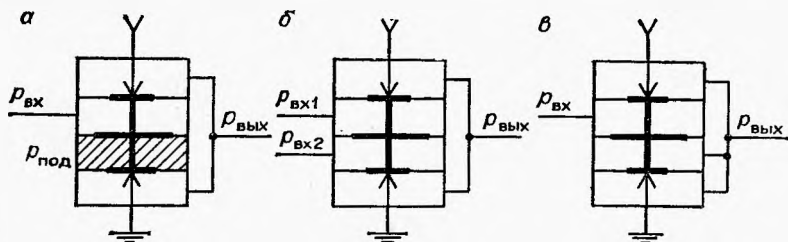


Рис. 108. Схемы включения двухходового элемента:

*а* — реле с подпором; *б* — двухходовое реле; *в* — повторитель давления.

прерывном изменении входного сигнала, называется, как указывалось в § 25, релейной, а устройство, обладающее такой характеристикой, — *реле*. Релейная характеристика двухвходового элемента приведена на рис. 109.

В некоторых двухвходовых элементах подпор мембранного блока создают не давлением воздуха, а пружиной.

Двухвходовой элемент может быть включен и по схеме с двумя входными сигналами  $p_{вх1}$  и  $p_{вх2}$  (см. рис. 108, б). Такое включение отличается от предыдущего тем, что вместо постоянного давления подпора подается второй входной сигнал  $p_{вх2}$ . В этом случае элемент работает как реле, на вход которого подается разность  $\Delta p = p_{вх1} - p_{вх2}$  входных сигналов. Следовательно, при таком включении двухвходовой элемент представляет собой последовательное соединение сумматора  $C$ , который производит вычитание входных сигналов, и реле  $P$  (рис. 110).

Двухвходовой элемент может работать как повторитель входного сигнала. Для этого его выходное давление  $p_{вых}$  подается в нижнюю глухую камеру (рис. 108, в). Так как проточные камеры соединены между собой, то результирующее усилие, приложенное к мембранному блоку, равно нулю, когда давления в камерах  $B$  и  $B$  одинаковые. Следовательно, в состоянии равновесия мембранного блока выходное давление  $p_{вых}$  всегда равно входному  $p_{вх}$ , т. е. повторяет его.

Четырехвходовой элемент (рис. 111) отличается от двухвходового только мембранным блоком, состоящим из пяти мембран, связанных одним штоком.

При этом, так же как в двухвходовом блоке, соблюдается чередование мембран большой и малой площади. Эти мембраны образуют четыре глухих и две проточные камеры.

Если проточные камеры соединить между собой, а в глухие подать четыре входных давления  $p_{вх1}$ ,  $p_{вх2}$ ,  $p_{вх3}$  и  $p_{вх4}$ , то при такой схеме включения элемент работает как четырехвходовое реле (рис. 111, а). При этом входные давления  $p_{вх1}$  и  $p_{вх3}$  создают на мембранном блоке усилия, направленные вниз, а давления  $p_{вх2}$  и  $p_{вх4}$  — усилия, направленные вверх. Поэтому результирующее усилие на мембранном блоке зависит от алгебраической суммы входных давлений:  $\Delta p = p_{вх1} - p_{вх2} + p_{вх3} - p_{вх4}$ .

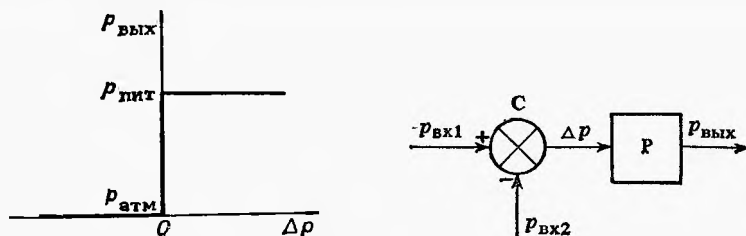


Рис. 109. Релейная характеристика двухвходового элемента.

Рис. 110. Структурная схема двухвходового элемента как реле:  
 $C$  — сумматор;  $P$  — реле.

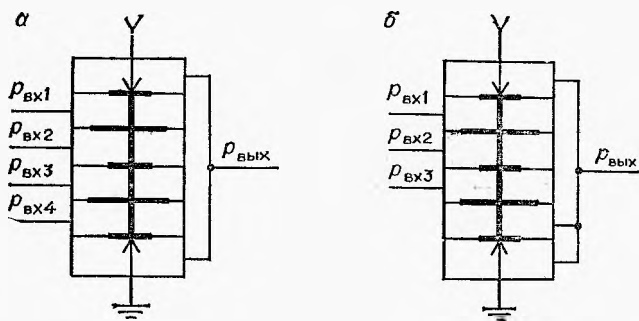


Рис. 111. Четырехходовый элемент:  
*а* — четырехходовое реле; *б* — алгебраический сумматор.

Четырехходовое реле, аналогично двухходовому, представляет собой последовательное соединение сумматора и реле. Структурная схема четырехходового реле подобна структурной схеме двухходового (см. рис. 110) и отличается от нее лишь числом входных сигналов сумматора.

Четырехходовый элемент, у которого выходное давление  $p_{\text{вых}}$  подается в нижнюю глухую камеру, работает как алгебраический сумматор трех входных сигналов  $p_{\text{вх1}}$ ,  $p_{\text{вх2}}$  и  $p_{\text{вх3}}$  (рис. 111, б). Как видно из схемы, в состоянии равновесия мембранного блока выходное давление  $p_{\text{вых}}$  равно алгебраической сумме входных давлений:

$$p_{\text{вых}} = p_{\text{вх1}} - p_{\text{вх2}} + p_{\text{вх3}} \quad (57)$$

**Усилитель мощности.** Представляет собой мощный повторитель давления (рис. 112). В него входит двухмембранный блок 1, в котором роль штока выполняет толкатель, имеющий внутренний канал, сообщающийся с атмосферой. В нижней части усилителя находится шариковый клапан 2, прижимаемый к седлу пружиной 3.

Усилитель мощности работает следующим образом.

Состояние равновесия мембранного блока наступает тогда, когда выходное давление  $p_{\text{вых}}$  равно входному  $p_{\text{вх}}$ . Если входное

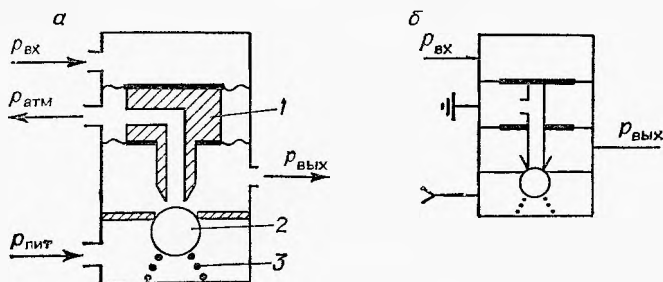


Рис. 112. Усилитель мощности:

*а* — устройство; *б* — схема;  
 1 — мембранный блок; 2 — шариковый клапан; 3 — пружина.

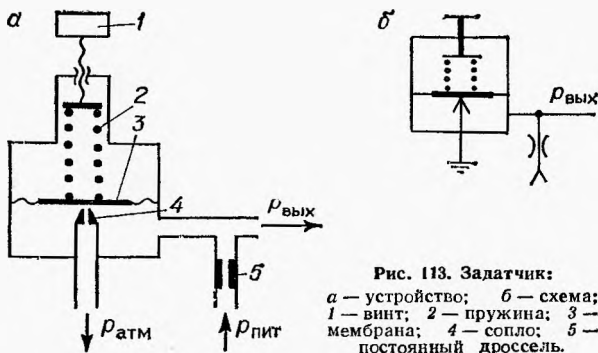


Рис. 113. Задатчик:  
 а — устройство; б — схема;  
 1 — винт; 2 — пружина; 3 —  
 мембрана; 4 — сопло; 5 —  
 постоянный дроссель.

давление увеличится, то мембранный блок переместится вниз и откроет нижнее седло. При этом выходное давление быстро увеличится до нового значения входного давления за счет большого притока питающего воздуха через седло. Если входное давление уменьшится, то мембранный блок переместится вверх и откроет верхнее седло. Выходное давление уменьшится до нового значения входного давления за счет стравливания воздуха в атмосферу через канал в штоке.

При большой длине пневмопровода усилители мощности устанавливают через каждые 300 м.

**Задатчик.** Предназначен для ручного изменения давления сжатого воздуха и используется, например, для создания постоянного давления подпора в реле. Действие задатчика (рис. 113) аналогично действию повторителя давления (см. рис. 106). Разница заключается в том, что усилие, действующее на мембрану 3 сверху, создается не входным давлением, а пружиной 2, сжимаемой винтом 1.

При винчивании винта в корпус задатчика выходное давление  $p_{\text{вых}}$  увеличивается, а при вывинчивании — уменьшается за счет изменения усилия пружины.

**Выключающее реле.** Выполняет операцию переключения сигналов в пневматических цепях. В состав выключающего реле (рис. 114) входят мембранный блок 1, подпираемый снизу пружиной 2.

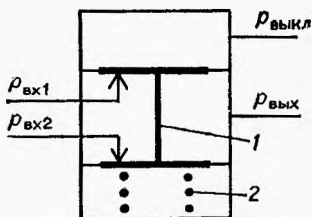


Рис. 114. Выключающее реле:  
 1 — мембранный блок; 2 — пружина.

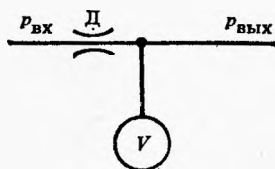


Рис. 115. Пневматическая интегрирующая цепь:  
 Д — дроссель, V — пневмокамера.

жиной 2, и два сопла, расположенные с внутренней стороны мембран. Мембранный блок может занимать два крайних положения: верхнее (под действием пружины 2) и нижнее (под действием выключающего сигнала  $p_{\text{выкл}}$ ). При этом происходит перекрытие одного из двух сопел, к которым подводятся входные давления  $p_{\text{вх1}}$  и  $p_{\text{вх2}}$ . Как видно из рис. 114, выходное давление  $p_{\text{вых}}$  при этом будет совпадать с одним из входных давлений:

$$\left. \begin{aligned} p_{\text{вых}} &= p_{\text{вх1}} \quad \text{при} \quad p_{\text{выкл}} = 0; \\ p_{\text{вых}} &= p_{\text{вх2}} \quad \text{при} \quad p_{\text{выкл}} = p_{\text{пит}} \end{aligned} \right\} \quad (58)$$

**Динамический элемент.** В пневмоавтоматике существует аналог электрической  $RC$ -цепи — пневматическая цепь, которая состоит из дросселя (пневморезистора)  $D$  и глухой пневмокамеры (пневмоемкости)  $V$  (рис. 115). Однако, в отличие от электрической  $RC$ -цепи, пневматическую применяют только как интегрирующую. Дело в том, что для применения ее как дифференцирующей цепи следовало бы в качестве выходного сигнала использовать перепад давлений на дросселе, что конструктивно неудобно для дальнейшего преобразования сигнала.

Так как основные законы пневматики аналогичны основным законам электротехники (см. § 14), то связь входного  $p_{\text{вх}}$  и выходного  $p_{\text{вых}}$  давлений пневматической интегрирующей цепи аналогична уравнению (54):

$$T p'_{\text{вых}} + p_{\text{вых}} = p_{\text{вх}} \quad (59)$$

Постоянная времени цепи  $T$  аналогично  $RC$ -цепи пропорциональна произведению пневмосопротивления дросселя и объема пневмокамеры.

### Контрольные вопросы

1. Какие функциональные элементы пневматических устройств Вы знаете?
2. Как включить двухходовый элемент для работы в качестве реле? четырехходовый?
3. Как получить из двухходового и четырехходового элементов повторитель давлений?
4. Можно ли на основе двухходового элемента построить сумматор? четырехходового?
5. Как влияет длина пневмопровода на работу пневматических устройств?
6. Для чего применяют пневматические усилители мощности?
7. В чем принцип действия пневматического задатчика и чем он отличается от повторителя давлений?

### § 29. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

В технике управления технологическими процессами наиболее широко применяют регуляторы двух ветвей ГСП: пневматической и электрической.

В электрической ветви в настоящее время существует несколько систем регуляторов. Рассмотрим регуляторы широко



распространенной электронной агрегатной унифицированной системы (ЭАУС).

Каждый регулятор ЭАУС состоит из двух блоков: измерительного и формирующего. Измерительный блок предназначен для алгебраического суммирования входных сигналов регулятора и пропорционального преобразования результирующего сигнала — рассогласования — в напряжение постоянного тока. Формирующий блок служит для преобразования этого напряжения в выходной сигнал регулятора по заданному закону регулирования.

Регуляторы ЭАУС работают с регулирующими органами, снабженными электрическим исполнительным механизмом (ЭИМ). Электродвигатели таких механизмов рассчитаны на напряжение определенной величины и имеют постоянную скорость вращения. Поэтому регулирующий орган с подобным исполнительным механизмом может перемещаться с постоянной скоростью (при включенном электродвигателе) или оставаться в неподвижном положении (при выключенном электродвигателе).

Изменять скорость перемещения регулирующего органа можно лишь в режиме периодического включения и выключения электродвигателя исполнительного механизма путем подачи на него импульсов напряжения постоянной амплитуды  $U_{\text{имп}}$  (рис. 116). При этом регулирующий орган будет перемещаться не непрерывно, а скачками. Однако если импульсы напряжения следуют достаточно часто друг за другом, то скачкообразное перемещение регулирующего органа будет восприниматься объектом управления как непрерывное управляющее воздействие.

Средняя скорость  $\mu'_{\text{ср}}$  такого перемещения регулирующего органа тем больше, чем больше время включенного состояния электродвигателя и меньше время его выключенного состояния, т. е. чем больше длительность импульсов  $t_{\text{имп}}$  и меньше паузы между ними  $t_{\text{пауз}}$ :

$$\mu'_{\text{ср}} = k_{\text{им}} U_{\text{имп}} \frac{t_{\text{имп}}}{t_{\text{имп}} + t_{\text{пауз}}}, \quad (60)$$

где  $k_{\text{им}}$  — коэффициент пропорциональности (коэффициент передачи исполнительного механизма).

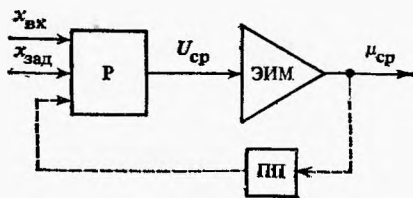
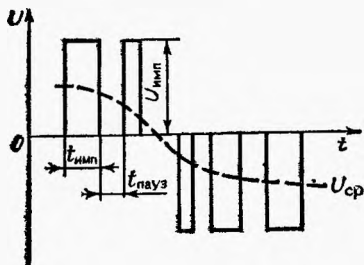


Рис. 116. Управление регулирующим органом с помощью ЭИМ постоянной скорости.

Рис. 117. Структурная схема соединения ЭИМ с регулятором:

$P$  — регулятор; ГП — преобразователь положения регулирующего органа.

Величина  $U_{\text{имп}} t_{\text{имп}} / (t_{\text{имп}} + t_{\text{пауз}})$  представляет собой среднее напряжение на электродвигателе  $U_{\text{ср}}$  (пунктирная линия на рис. 116). Поэтому формулу (60) можно написать в виде:

$$\mu'_{\text{ср}} = k_{\text{им}} U_{\text{ср}}. \quad (61)$$

Из этой формулы видно, что если в качестве выходного сигнала регулятора принять среднюю величину  $U_{\text{ср}}$  его импульсного выходного напряжения, то средняя скорость  $\mu'_{\text{ср}}$  перемещения регулирующего органа оказывается пропорциональной этому среднему напряжению.

На рис. 117 показана структурная схема соединения регулятора с ЭИМ. Электродвигатель ЭИМ, как указывалось в § 13, представляет собой интегратор. Наличие интегратора в цепи после регулятора приводит к тому, что закон регулирования, формируемый регулятором в комплекте с ЭИМ, не совпадает с законом регулирования самого регулятора.

Регулятор Р предназначен для формирования ПИ-закона регулирования с учетом свойств ЭИМ, т. е. по отношению к положению регулирующего органа. При этом, как отмечалось, под выходными сигналами регулятора и ЭИМ следует понимать не фактическое импульсное выходное напряжение регулятора  $U_{\text{имп}}$  и скачкообразно изменяющееся положение регулирующего органа  $\mu$ , а их средние значения  $U_{\text{ср}}$  и  $\mu_{\text{ср}}$ . Тогда в соответствии с формулой (42) можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\text{ср}} &= \mu_0 + k \Delta x; \\ \mu'_0 &= \frac{k}{T_{\text{н}}} \Delta x. \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

Выясним, какой при этом закон должен формироваться в самом регуляторе. Для этого найдем из формул (62) среднюю скорость перемещения регулирующего органа  $\mu'_{\text{ср}}$ . Так как скорость суммы двух переменных величин равна сумме их скоростей, то получим:

$$\mu'_{\text{ср}} = \mu'_0 + k \Delta x' = \frac{k}{T_{\text{н}}} (\Delta x + T_{\text{н}} \Delta x'). \quad (63)$$

Подставляя эту скорость в формулу (61), найдем среднее выходное напряжение регулятора  $U_{\text{ср}}$ :

$$U_{\text{ср}} = \frac{k}{k_{\text{им}} T_{\text{н}}} (\Delta x + T_{\text{н}} \Delta x'). \quad (64)$$

Из сравнения с формулой (40) видно, что это выражение представляет собой ПД-закон регулирования. В этом законе постоянная составляющая управляющего воздействия равна нулю, коэффициент передачи равен  $\frac{k}{k_{\text{им}} T_{\text{н}}}$ , а величина  $T_{\text{н}}$  — время интегрирования в ПИ-законе (62) — играет роль времени предвращения.

Таким образом, для формирования ПИ-закона регулирования в комплекте с электрическим исполнительным механизмом

регулятор Р должен формировать ПД-закон регулирования с нулевой постоянной составляющей.

Регулятор Р в комплекте с ЭИМ может формировать и П-закон регулирования. Для этого он вместе с ЭИМ охватывается отрицательной обратной связью через преобразователь положения регулирующего органа *ПП* (см. пунктирную линию на рис. 117). В получающейся при этом следящей системе при достаточно большом коэффициенте передачи преобразователя *ПП* можно считать, что рассогласование  $\Delta x = x_{\text{вх}} - x_{\text{зад}}$  в ней равно нулю. Тогда связь выходного сигнала ЭИМ — положения регулирующего органа  $\mu_{\text{ср}}$  — с рассогласованием на входе регулятора  $\Delta x$  определяется только преобразователем *ПП* в цепи обратной связи.

Этот преобразователь имеет линейную характеристику. Поэтому искомая зависимость также получается линейной:

$$\mu_{\text{ср}} = \mu_0 + k \Delta x. \quad (65)$$

Полученная зависимость и есть П-закон регулирования.

Таким образом, создание глубокой обратной связи между выходом электрического исполнительного механизма и входом регулятора делает регулятор статическим. Без обратной связи регулятор вместе с электрическим исполнительным механизмом всегда астатический.

Рассмотрим теперь принцип действия промышленного регулятора РП2. Его блок-схема приведена на рис. 118, *а*, а структурная схема — на рис. 118, *б* (для простоты рассматривается схема регулятора без обратной связи от ЭИМ). Как указывалось, регулятор состоит из двух блоков: измерительного *ИБ* и формирующего *ФБ*.

Измерительный блок включает сумматор *С1* и преобразователь *П*. Входные сигналы регулятора  $x_{\text{вх}}$  и  $x_{\text{зад}}$  алгебраически суммируются в сумматоре *С1*, и сигнал рассогласования  $\Delta x$  преобразуется преобразователем *П* в пропорциональное ему напряжение постоянного тока  $U_{\text{вх}}$ .

В системе ЭАУС четыре типа измерительных блоков:

И-УЗ, имеющий четыре входа для унифицированных сигналов постоянного тока;

И-ПЗ, имеющий четыре входа для сигналов трансформаторных преобразователей;

И-СЗ, имеющий три входа — два для сигналов от термометров сопротивления и один для унифицированного сигнала постоянного тока;

И-ТЗ, имеющий два входа — один для сигнала от термопары и один для унифицированного сигнала постоянного тока.

Алгебраическое суммирование входных сигналов во всех измерительных блоках, кроме И-СЗ, производится непосредственно во входной цепи усилителей. В блоке И-СЗ термометры сопротивления включаются в смежные плечи неуравновешенного моста (или в одно плечо при работе с одним термометром сопро-

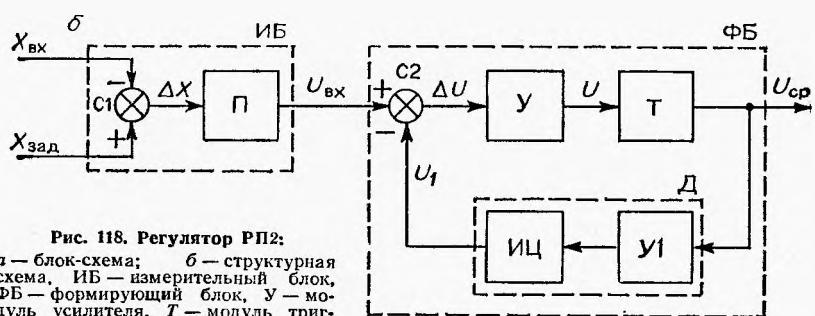
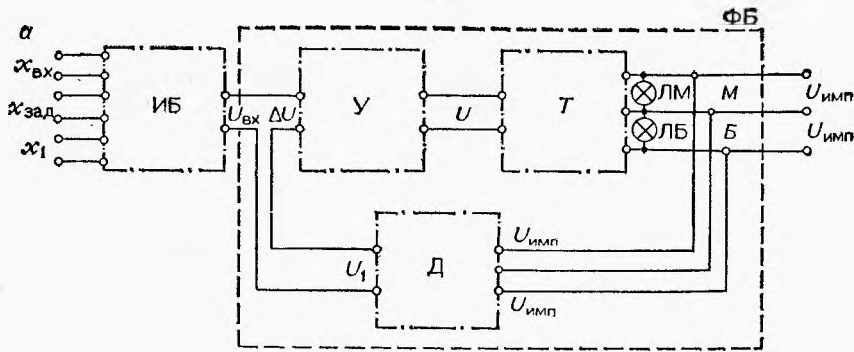


Рис. 118. Регулятор РП2:

*а* — блок-схема; *б* — структурная схема, ИБ — измерительный блок, ФБ — формирующий блок, У — модуль усилителя, Т — модуль триггера, Д — модуль динамики; ЛМ, ЛБ — сигнальные лампы, С1, С2 — сумматоры, П — преобразователь измерительного блока, ИЦ — интегрирующая цепь, У1 — усилитель модуля динамики.

тивления), а выходное напряжение моста подается на вход магнитного усилителя.

Формирующий блок регулятора состоит из четырех модулей: усилителя У, триггера Т, динамики Д и питания (на рис. 118 модуль питания не показан).

Как видно из структурной схемы, этот блок представляет собой следящую систему. Входной сигнал системы — напряжение  $U_{вх}$  — алгебраически суммируется (вычитается) в сумматоре С2 с выходным сигналом модуля динамики — напряжением  $U_1$ . Суммирование производится непосредственно во входной цепи усилителя У. Разностный сигнал  $\Delta U$  усиливается транзисторным усилителем постоянного тока до напряжения  $U$ . Это напряжение управляет мощным триггером Т с двумя выходами — М (меньше) и Б (больше).

Выходной сигнал триггера  $U_{имп}$  подается на ЭИМ постоянной скорости. При наличии этого напряжения на выходе М двигателя ЭИМ вращается в одну сторону, а на выходе Б — в другую. Напряжение на одном из выходов триггера сигнализируется лампами ЛМ или ЛБ. Триггер задает импульсный режим работы регулятора,

Рассмотрим принцип действия триггера. В § 27 отмечалось, что в зависимости от знака входного напряжения  $U$  триггер может находиться в одном из двух устойчивых состояний, характеризующихся наличием напряжения  $U_{\text{имп}}$  на одном из его выходов. Предположим, что входное напряжение  $U$  положительное и ему соответствует напряжение на выходе  $B$ . Тогда напряжение  $U_1$  на выходе модуля динамики  $D$  будет расти и за счет отрицательной обратной связи разностное напряжение  $\Delta U$  станет уменьшаться. В результате будет уменьшаться и усиленное напряжение  $U$ , и когда оно станет отрицательным, триггер перебросится в другое состояние — напряжение  $U_{\text{имп}}$  пропадет на выходе  $B$  и появится на выходе  $M$ . Теперь за счет обратной связи напряжение  $\Delta U$ , а следовательно, и  $U$  будет увеличиваться, что снова приведет к переброске триггера.

Таким образом, в замкнутой системе с обратной связью установится импульсный режим — напряжение на каждом из выходов триггера будет иметь вид повторяющихся импульсов с амплитудой  $U_{\text{имп}}$ . Однако такой режим работы неприемлем для ЭИМ, так как электродвигатель при этом будет безостановочно переключаться с одного направления вращения на другое.

Чтобы избежать частого переключения ЭИМ, в триггер вводят зону нечувствительности. Для этого триггер делают таким, что, пока входное напряжение  $U$  достаточно мало по абсолютному значению (мало отличается от нуля), он не срабатывает, т. е. напряжение на обоих его выходах отсутствует. Такому состоянию триггера соответствует пауза между импульсами (см. рис. 116), и регулирующий орган в это время остается неподвижным.

Как отмечалось при рассмотрении закона регулирования регулятора, импульсное выходное напряжение регулятора или, что то же самое, триггера следует заменить эквивалентным ему средним напряжением  $U_{\text{ср}}$  (см. рис. 116). В модуле динамики  $D$  это напряжение усиливается усилителем  $\mathcal{U}1$  и затем преобразуется в напряжение  $U_1$  интегрирующей  $RC$ -цепью  $ИЦ$ . Поэтому в соответствии с формулой (54) можно записать:

$$TU'_1 + U_1 = k_1 U_{\text{ср}}, \quad (66)$$

где  $k_1$  — коэффициент усиления усилителя  $\mathcal{U}1$ .

Глубина обратной связи следящей системы (см. рис. 118) настолько велика, что рассогласование — разностное напряжение  $\Delta U$  — всегда близко к нулю. Поэтому можно положить, что  $U_1 = U_{\text{вх}}$ . Тогда, заменяя в уравнении (66)  $U_1$  на  $U_{\text{вх}}$ , находим, что в формирующем блоке реализуется ПД-закон регулирования относительно входного сигнала блока  $U_{\text{вх}}$ :

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{k_1} (U_{\text{вх}} + TU'_{\text{вх}}). \quad (67)$$

Так как напряжение  $U_{\text{вх}}$  пропорционально рассогласованию  $\Delta x$ , т. е.  $U_{\text{вх}} = k_{\text{и6}} \Delta x$ , то и весь регулятор РП2 действительно

формирует ПД-закон регулирования:

$$U_{\text{ср}} = \frac{k_{\text{нб}}}{k_1} (\Delta x + T \Delta x'), \quad (68)$$

где  $k_{\text{нб}}$  — коэффициент передачи преобразователя П измерительного блока.

На переднюю панель измерительных блоков выведены органы настройки: «Чувствительность» по каждому входу и «Корректор» для установки нуля входного напряжения. Измерительные блоки могут работать как с реостатными задатчиками, так и с бесконтактными токовыми. В скомплектованном регуляторе к его наименованию добавляется наименование измерительного блока, например, РП2-У3, РП2-Т3 и т. д.

На переднюю панель формирующих блоков выведены следующие органы настройки: «Скорость связи» (величина, обратно пропорциональная коэффициенту передачи), «Время интегрирования», «Нечувствительность» (зона нечувствительности триггера), «Импульс» (длительность импульсов и пауз выходного напряжения), «Демпфер» (сглаживание частых колебаний входного сигнала), кнопка контроля нуля и «Корректор» (установка нулевого выходного напряжения регулятора при нажатой кнопке контроля нуля). Кроме того, на переднюю панель выведены сигнальные лампы ЛМ и ЛБ.

Рассмотрим работу ЭИМ. Его электродвигатель, управляемый регулятором  $P$ , может исполнять три команды: при наличии напряжения  $U_{\text{имп}}$  на выходе  $M$  двигатель вращается в одну сторону, а на выходе  $B$  — в другую сторону. При отсутствии напряжений на обоих выходах двигатель неподвижен. Схема управления таким электродвигателем приведена на рис. 119.

Включение и остановка электродвигателя  $M$  по командам регулятора производится в режиме  $A$  — автоматическое управление. В случае необходимости, например, при выходе регулятора из строя, можно перейти на режим  $D$  — ручное дистанционное управление, т. е. включать и останавливать электродвигатель кнопками. Изменение режима управления осуществляется с помощью переключателя  $P$ , который имеет два положения:  $A$  и  $D$ . В положении  $D$  при включении кнопок  $K_{\text{нМ}}$  (меньше) и  $K_{\text{нБ}}$  (больше) на электрический исполнительный механизм подаются сигналы, аналогичные одноименным выходным сигналам регулятора.

Передача управляющих команд к электродвигателю производится через тиристорный пускатель  $ТП$ , который служит для усиления мощности командных сигналов. В состав тиристорного пускателя входят два бесконтактных двухполюсных полупроводниковых ключа  $K_{\text{М}}$  и  $K_{\text{Б}}$  и блок питания  $БП$ . Двухполюсный ключ, в отличие от однополюсного, изображенного на рис. 103, при наличии управляющего напряжения включает сразу две фазы:  $A$  и  $B$ .

При подаче маломощного управляющего сигнала  $U_{\text{имп}}$  (в любом режиме управления) включается соответствующий ключ,

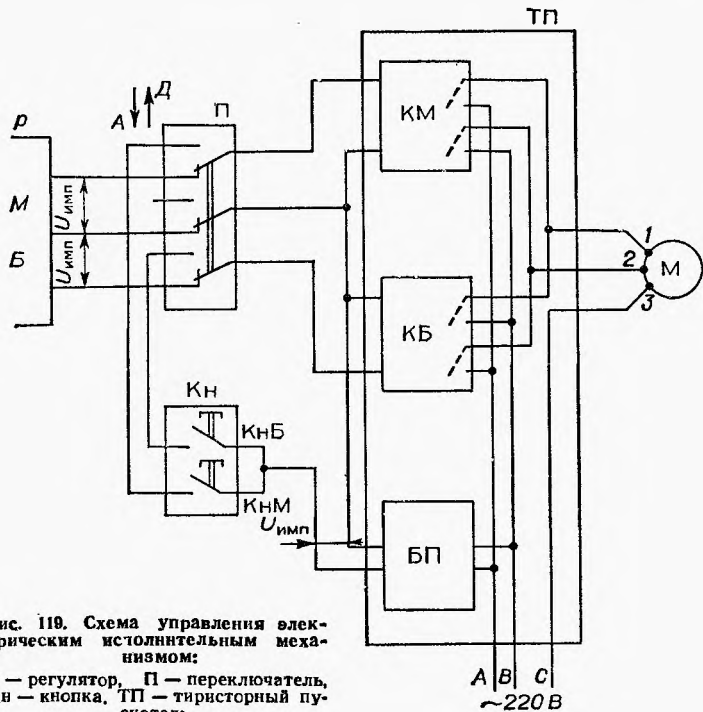


Рис. 119. Схема управления электрическим исполнительным механизмом:

Р — регулятор, П — переключатель, Кн — кнопка, ТП — тиристорный пускатель.

соединяющий электродвигатель  $M$  с двумя фазами трехфазного силового напряжения  $A$  и  $B$ . Третья фаза  $C$  соединена с электродвигателем постоянно. Направление вращения электродвигателя зависит от команды. По команде с выхода  $M$  или от кнопки  $КнМ$  срабатывает ключ  $КМ$ , а по команде с выхода  $B$  или от кнопки  $КнБ$  — ключ  $КБ$ .

В первом случае провод 1 электродвигателя будет соединен с фазой  $A$ , а провод 2 — с фазой  $B$ . Во втором случае провод 1 будет соединен с фазой  $B$ , а провод 2 — с фазой  $A$ . При таком переключении двух фаз питания электродвигатель будет изменять направление вращения и, следовательно, увеличивать или уменьшать степень открытия регулирующего органа.

Сигналы на выходах  $M$  и  $B$  регулятора  $P$  представляют собой импульсы напряжения с амплитудой  $U_{имп}$ . Для выработки аналогичного сигнала при ручном дистанционном управлении в тиристорном пускателе  $ТП$  предусмотрен блок питания  $БП$ .

### Контрольные вопросы

1. Каким образом регулятор изменяет среднюю скорость ЭИМ постоянной скорости?
2. Какой закон формирует регулятор без ЭИМ?
3. Из каких элементов состоит формирующий блок РП2?
4. Как получить П-закон регулирования в регуляторе РП2?

Пневматические регуляторы создают из унифицированных элементов и модулей, каждый из которых выполняет какую-либо одну простую операцию. Унифицированные элементы регуляторов рассматривались в § 28.

Главной частью пневматической ветви ГСП является система «Старт». Регуляторы этой системы предназначены для работы с регулирующими органами, снабженными пневматическим исполнительным механизмом, и используют унифицированные пневматические сигналы. Основными в системе «Старт» являются регуляторы:

позиционные (релейные) — ПР1.5, ПР1.6;

пропорциональные (П) — ПР2.5, ПР2.8;

пропорционально-интегральные (ПИ) — ПР3.21, ПР3.22, ПР3.23, ПР3.31;

пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) — ПР3.25, ПР3.35.

**Двухпозиционный регулятор ПР1.5.** Предназначен для формирования двухпозиционного релейного закона регулирования. Принципиальная и структурная схемы регулятора приведены на рис. 120. Он состоит из местного (встроенного) задатчика ЗД с постоянным дросселем ПД, двухвходового элемента 2Э и усилителя мощности УМ.

Задатчиком устанавливают задание — давление  $p_{зад}$ . Двухвходовый элемент здесь включен по схеме двухвходового реле и выполняет функции сумматора С и реле Р (см. рис. 108, б и 110). Поэтому выходной сигнал двухвходового элемента  $p_{вых}$  связан с рассогласованием  $\Delta p = p_{зад} - p_{вх}$  зависимостью (56).

Усилитель мощности УМ (повторитель) служит для усиления маломощного выходного сигнала элемента 2Э без изменения его величины.

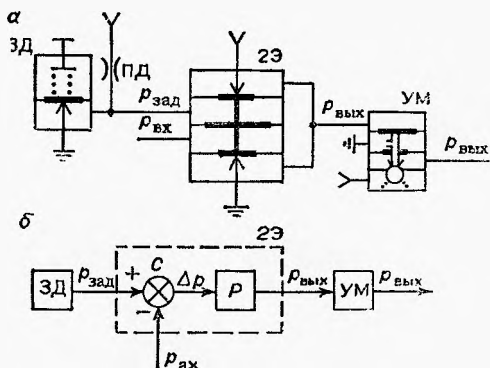


Рис. 120. Двухпозиционный (релейный) регулятор ПР1.5:

а — принципиальная схема; б — структурная схема; ЗД — задатчик; ПД — постоянный дроссель; 2Э — двухвходовый элемент; УМ — усилитель мощности; С — сумматор, Р — реле.



Сравнивая формулы (56) и (45), убеждаемся, что регулятор ПР1.5 формирует релейный двухпозиционный закон регулирования.

**Пропорциональный регулятор ПР2.5.** Предназначен для формирования П-закона регулирования. Принципиальная и структурная схемы регулятора приведены на рис. 121.

Регулятор состоит из модуля П, формирующего П-составляющую закона регулирования, и местного (встроенного) задатчика ЗД с постоянным дросселем ПД1. Модуль П включает два четырехходовых элемента 4Э1 и 4Э2, постоянный ПД2 и регулируемый РД дроссели (образующие дроссельный сумматор ДС),

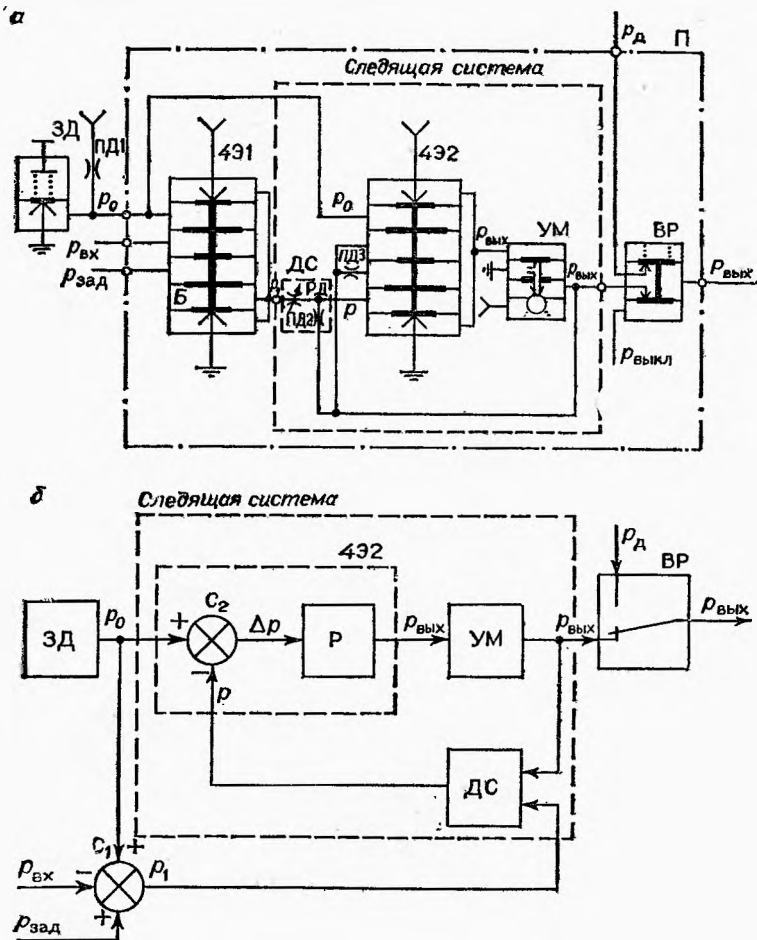


Рис. 121. Пропорциональный регулятор ПР2.5:

а — принципиальная схема; б — структурная схема; ПД1, ПД2, ПД3 — постоянные дроссели; РД — регулируемый дроссель; ДС — дроссельный сумматор; С1, С2 — сумматоры; 4Э1, 4Э2 — четырехходовые элементы; ВР — выключающее реле; П — модуль П-составляющей закона регулирования; Б — камера (остальные обозначения см. рис. 120).

усилитель мощности УМ, выключающее реле ВР и стабилизирующий постоянный дроссель ПДЗ.

Элемент сравнения 4Э1 охвачен отрицательной обратной связью путем подачи его выходного давления  $p_1$  в камеру Б. Следовательно, он работает в режиме сумматора (С1 на рис. 121, б) и алгебраически суммирует давления  $p_0$ ,  $p_{вх}$  и  $p_{зад}$  — см. формулу (57):

$$p_1 = p_0 - p_{вх} + p_{зад}, \quad (69)$$

где  $p_0$  — выходное давление местного задатчика ЗД.

Элемент 4Э2 работает в релейном режиме и совмещает функции сумматора С2 и реле Р.

Из структурной схемы регулятора видно, что элемент 4Э2, усилитель мощности УМ и дроссельный сумматор ДС образуют следящую систему, в цепь обратной связи которой вводится дополнительный сигнал — выходное давление  $p_1$  сумматора С1. Реле Р в этой системе, как отмечалось в § 27, можно рассматривать как усилитель с большим коэффициентом усиления. Это означает, что глубина обратной связи в рассматриваемой следящей системе очень большая и, следовательно, рассогласование  $\Delta p = p_0 - p$  близко к нулю.

Тогда можно положить  $p = p_0$  и найти связь между входными сигналами системы  $p_0$ ,  $p_1$  и выходным  $p_{вых}$ . Как видно из рис. 121, б, эта связь определяется характеристикой дроссельного сумматора ДС, которая согласно формуле (25) имеет вид (при замене  $p_2$  на  $p$  и  $p_3$  на  $p_{вых}$ ):

$$p = \frac{R_2}{R_1 + R_2} p_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} p_{вых} \quad (70)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — пневматические сопротивления соответственно регулируемого дросселя РД и постоянного дросселя ПД2.

Заменив в этом уравнении  $p$  на  $p_0$ , подставим  $p_1$  из формулы (69) и, решая полученное уравнение относительно выходного сигнала  $p_{вых}$ , получим:

$$p_{вых} = p_0 + \frac{R_2}{R_1} (p_{вх} - p_{зад}). \quad (71)$$

Сравнивая формулы (71) и (39), убеждаемся, что регулятор ПР2.5 формирует П-закон регулирования, в котором давление  $p_0$  играет роль постоянной составляющей, разность давлений  $p_{вх} - p_{зад}$  является рассогласованием, а отношение пневмосопротивлений  $\frac{R_2}{R_1}$  — коэффициентом передачи регулятора.

Давление  $p_0$  устанавливают местным задатчиком, давление задания  $p_{зад}$  — отдельным задатчиком, коэффициент передачи — регулируемым дросселем РД.

Усилитель мощности УМ в регуляторе ПР2.5 выполняет ту же функцию, что и в регуляторе ПР1.5. Выключающее реле ВР работает в режиме ключа и служит для переключения с автоматического на ручное дистанционное управление. При нулевом

переключающем давлении  $p_{\text{выкл}}$  это реле пропускает на выход регулятора выходное давление усилителя мощности (режим «Автоматическое управление»). При давлении  $p_{\text{выкл}} = p_{\text{пит}}$  на выход регулятора попадает давление  $p_d$  от ручного задатчика (режим «Ручное управление»). Регулятор ПР2.5 имеет ручки установки давления  $p_0$  и предела пропорциональности (величины, обратной коэффициенту передачи).

**Пропорционально-интегральный регулятор ПР3.21.** Предназначен для формирования ПИ-закона регулирования. Принципиальная и структурная схемы регулятора приведены на рис. 122. Регулятор включает два модуля: модуль *П* П-составляющей и модуль *И* И-составляющей закона регулирования. Модуль *П* описан в пропорциональном регуляторе ПР2.5, а модуль *И* формирует интегральную составляющую  $p_0$ , которая в регуляторе ПР2.5 была постоянной и задавалась задатчиком. Этот модуль состоит из четырехходового элемента 4Э, интегрирующей цепи ИЦ (в виде регулируемого дросселя РД и глухой пневмокамеры *V*) и выключающего реле ВР. Элемент 4Э работает в режиме сумматора аналогично сумматору С1 в регуляторе ПР2.5.

Как видно из рис. 122, модуль *И* представляет собой замкнутую систему с положительной обратной связью. Найдем зави-

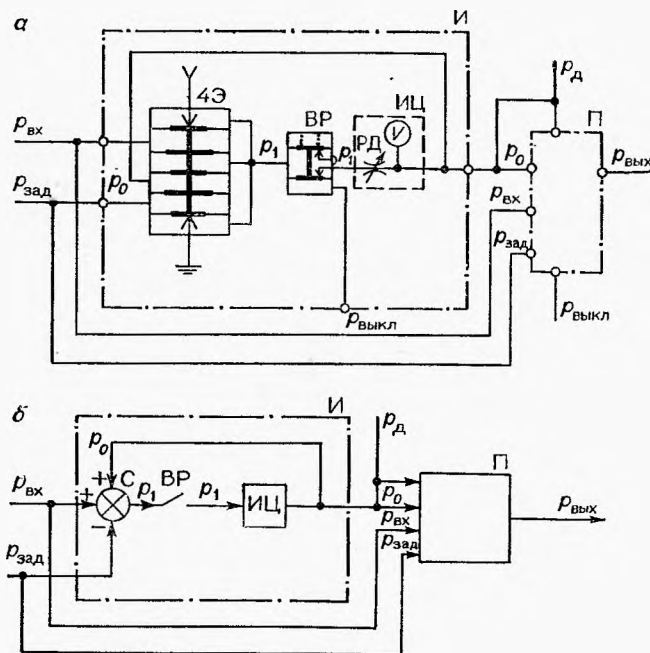


Рис. 122. Пропорционально-интегральный регулятор ПР 3.21;

*a* — принципиальная схема; *б* — структурная схема; П, И — модули П- и И-составляющих закона регулирования, ИЦ — интегрирующая цепь, *V* — пневмокамера (остальные обозначения см. рис. 120, 121).

симость выходного давления  $p_0$  этой системы от ее входных давлений  $p_{вх}$  и  $p_{зад}$ . Для элемента 4Э согласно формуле (57) имеем:

$$p_1 = p_{вх} - p_{зад} + p_0 \quad (72)$$

а для интегрирующей цепи согласно формуле (59):

$$T_{и} p_0' + p_0 = p_1 \quad (73)$$

где  $p_0'$  — скорость изменения давления  $p_0$ ;  $T_{и}$  — время интегрирования.

Подставляя сюда  $p_1$  из формулы (72), получим уравнение для И-составляющей закона регулирования:

$$p_0' = \frac{1}{T_{и}} (p_{вх} - p_{зад}) \quad (74)$$

Таким образом, в регуляторе ПР3.21, в отличие от регулятора ПР2.5, давление  $p_0$  не постоянно, а изменяется в соответствии с И-составляющей, что и обеспечивает ПИ-закон регулирования. Время интегрирования И-составляющей  $T_{и}$ , как указывалось в § 28, пропорционально произведению пневматического сопротивления регулируемого дросселя  $РД$  и емкости пневмокамеры  $V$  и может изменяться регулируемым дросселем.

Выключающее реле  $ВР$  такое же, как в модуле  $П$ , и предназначено для плавного перехода с ручного управления на автоматическое. При ручном управлении это реле отключает интегрирующую цепь от элемента 4Э, и она оказывается подключенной к линии ручного управления. Таким образом, при ручном управлении  $p_0 = p_d$ , что обеспечивает постоянную готовность регулятора к плавному переходу на автоматическое управление.

Регулятор ПР3.21 имеет два органа настройки: предела пропорциональности (в модуле  $П$ ) и времени интегрирования (в модуле  $И$ ).

**Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор ПР3.25.** Предназначен для формирования ПИД-закона регулирования. Принципиальная схема регулятора приведена на рис. 123, а. Регулятор включает три модуля:  $П$ ,  $И$  и  $Д$ . Модули  $П$  и  $И$  уже описаны. Модуль  $Д$   $Д$ -составляющей закона регулирования состоит из двухвходового элемента 2Э, интегрирующей цепи  $ИЦ$  (в виде регулируемого дросселя  $РД$  и глухой пневмокамеры  $V$ ), постоянного дросселя  $ПД$  и выключающего реле  $ВР$ . Двухвходовый элемент 2Э здесь включен по схеме, отличающейся от схемы его включения в регуляторе ПР1.5. Давление питания подводится в нижнюю камеру  $A$  через постоянный дроссель  $ПД$ , а сопло верхней камеры  $Г$  заглушено. Несмотря на это отличие, элемент выполняет функции сумматора и реле.

Принцип действия модуля  $Д$  рассмотрим по его структурной схеме (рис. 123, б). Из схемы видно, что он представляет собой следящую систему. При этом, так же как в следящей системе на рис. 121, б, наличие реле  $Р$  обеспечивает очень малое рассогласование  $\Delta p$ , и, следовательно, можно считать  $p_{вх} = p$ . Тогда

связь выходного давления  $p_1$  модуля  $D$  с входным  $p_{вх}$  будет определяться только обратным преобразователем — интегрирующей цепью ИЦ. Поэтому в соответствии с формулой (73) имеем:

$$T_d p'_{вх} + p_{вх} = p_1, \quad (75)$$

где  $p'_{вх}$  — скорость изменения давления  $p_{вх}$ , а постоянная времени интегрирующей цепи в данном случае играет роль времени предварения и поэтому обозначена  $T_d$ .

Время предварения  $D$ -составляющей  $T_d$ , как указывалось, пропорционально произведению пневматического сопротивления регулируемого дросселя  $RD$  и емкости пневмокамеры  $V$  и поэтому может быть изменено регулируемым дросселем.

Из формулы (75) следует, что модуль  $D$ , строго говоря, формирует не  $D$ - а  $PD$ -составляющую с нулевой постоянной составляющей и единичным коэффициентом передачи — см. формулу (40).

Вместе же с модулем  $II$  получается  $PD$ -составляющая с изменяемым коэффициентом передачи. Действительно, в соответствии с рис. 123, *a* на вход модуля  $II$  в ПИД-регуляторе подается давление  $p_1$  (вместо  $p_{вх}$  в  $II$ - и  $ПИ$ -регуляторах). Поэтому, заменяя в уравнении модуля  $II$  (71)  $p_{вх}$  на  $p_1$  и подставляя вместо  $p_1$  его выражение из формулы (75), получим:

$$p_{вых} = p_0 + \frac{R_2}{R_1} (p_{вх} - p_{зад} + T_d p'_{вх}), \quad (76)$$

где  $\frac{R_2}{R_1}$  — как и прежде, коэффициент усиления регулятора, устанавливаемый в модуле  $II$ .

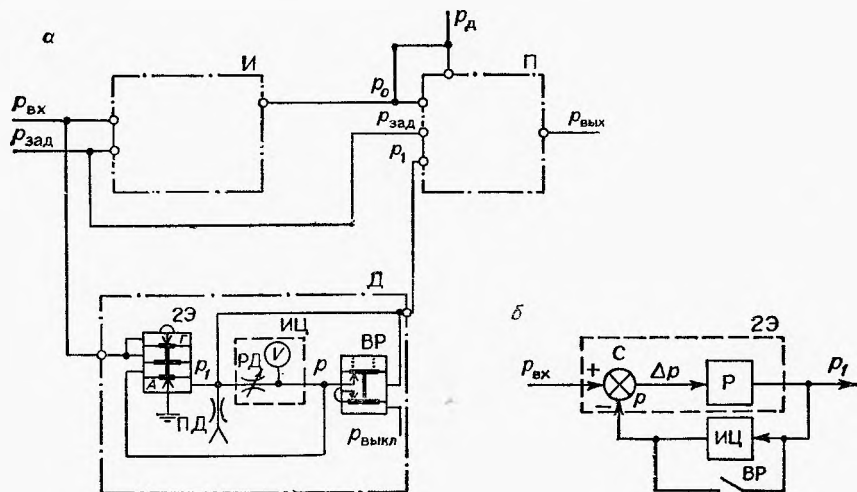


Рис. 123. Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор ПР3.25:  
*a* — принципиальная схема; *b* — структурная схема модуля  $D$ ;  $D$  — модуль  $D$ -составляющей закона регулирования,  $A$ ,  $\Gamma$  — камеры (остальные обозначения см. рис. 120—122).

В рассматриваемом регуляторе И-составляющая  $p_0$  формируется в модуле  $I$  и определяется уравнением (74).

Выключающее реле  $BP$  в модуле  $D$  аналогично рассмотренным и предназначено для исключения  $D$ -составляющей из закона регулирования (путем замыкания интегрирующей цепи).

Регулятор ПР3.25 имеет три органа настройки: предела пропорциональности (в модуле  $II$ ), времени интегрирования (в модуле  $I$ ) и времени предварения (в модуле  $D$ ).

**Станция управления пневматическим исполнительным механизмом.** Пневматические регуляторы системы «Старт» могут устанавливаться непосредственно на задней стенке прибора ПВ или отдельно от него. Приборы, предназначенные для работы с регуляторами (ПВ3.2, ПВ10.1 и ПВ10.2), имеют три показывающих устройства: для регулируемого параметра, его заданного значения и входного сигнала исполнительного механизма. Такие приборы снабжают станцией управления (рис. 124).

В станцию входят два кнопочных пневматических переключателя 2 и 3 с шариковыми клапанами 4, ручной задатчик 1, усилитель мощности 7 и два выключающих реле 5 и 6.

Задатчик предназначен для установки вручную давления задания при работе регулятора и для изменения давления воздуха, направляемого к исполнительному механизму при ручном дистанционном управлении. В последнем случае регулятор отключают. Давление  $p_{зад}$  усиливается усилителем мощности 7 и через выключающие реле 5 и 6 подается на вход регулятора или прямо на исполнительный механизм. Сигнал задания на вход

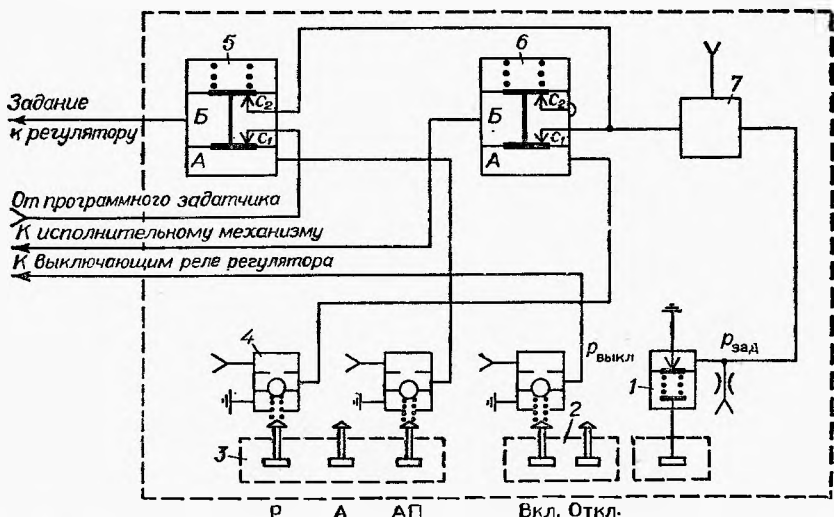


Рис. 124. Станция управления прибора ПВ:

1 — задатчик; 2, 3 — кнопочные переключатели; 4 — шариковый клапан; 5, 6 — выключающие реле; 7 — усилитель мощности; А, Б — камеры; С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub> — сопла; А, Р, АП — кнопки.

Таблица 8. Режимы работы станции управления

Кнопка	Дистанционное управление	Промежуточное положение	Автоматическое регулирование	Автоматическое программное регулирование
<i>P</i>	Нажата	—	—	—
<i>A</i>	—	Нажата	Нажата	—
<i>АП</i>	—	—	—	Нажата
<i>ВКЛ</i>	—	—	Нажата	»
<i>ОТКЛ</i>	Нажата	Нажата	—	—

регулятора может также поступать через реле 5 от программного задатчика.

Еще одним выходным сигналом станции управления является давление  $p_{\text{выкл}}$ , которое управляет выключающими реле регулятора.

Переключатели 2 и 3 служат для отключения регулятора в случае его неисправности и перехода на ручное регулирование. Они позволяют включать и отключать регулятор, а также дистанционно управлять исполнительным механизмом и обеспечивать работу регулятора с программным задатчиком.

Кнопочный механизм переключателей состоит из пяти кнопок, которые служат для подачи сигналов на выключающие реле станции управления и регулятора. Кнопка *P* предназначена для переключения станции в состояние, при котором возможно ручное дистанционное управление исполнительным механизмом. Кнопка *A* обеспечивает перевод станции в состояние, при котором регулятор включен в систему автоматического регулирования. Кнопка *АП* позволяет подключать к регулятору программный задатчик. Кнопки *P* и *АП* соединены с выключающими реле 5 и 6. Кнопки *ВКЛ* и *ОТКЛ* служат для включения и отключения регулятора. Кнопка *ВКЛ* соединена с выключающими реле регулятора. Если эта кнопка не нажата, давление  $p_{\text{выкл}}$  попадает в выключающие реле регулятора. При включении кнопки шариковый клапан 4 закрывается и выключающие реле сообщаются с атмосферой. Возврат кнопки *ВКЛ* в исходное положение производится нажатием кнопки *ОТКЛ*.

Положение кнопок переключателей при различных режимах работы станции управления приведено в табл. 8.

### Контрольные вопросы

1. Какие законы регулирования формируют регуляторы системы «Старт»?
2. Используется ли обратная связь в двухпозиционном релейном регуляторе ПР1.5? в пропорциональном регуляторе ПР2.5?
3. Для чего в модуле формирования П-закона регулирования применена следящая система?
4. Как производится формирование И-составляющей в пропорционально-интегральном регуляторе? Д-составляющей в ПИД-регуляторе?
5. Какие режимы управления можно реализовать с помощью станции управления пневматическими регуляторами?

В последнее время в локальных АСР стала применяться вычислительная техника. На ее основе выпускаются программируемые микропроцессорные регуляторы «Ремиконт». Один такой регулятор может заменить несколько десятков обычных электрических регуляторов, таких, как РП2. Например, регулятор «Ремиконт» Р-100 заменяет 64 регулятора РП2. Он имеет 64 входа для присоединения измерительных устройств и столько же выходов для управления исполнительными механизмами.

Входным сигналом «Ремиконта» является постоянный ток, изменяющийся в диапазоне 0—5 мА (унифицированный сигнал ГСП). Поэтому измерительная цепь любого технологического параметра должна включать нормирующий преобразователь. Например, если регулируемый параметр — температура, то измерительная цепь составляется из термометра сопротивления и преобразователя НП-СЛ1-М (рис. 125, а) или из термопары и преобразователя НП-ТЛ1-М (рис. 125, б). При регулировании расхода измерительная цепь будет включать диафрагму и дифманометр с токовым выходом ДМ-Э (рис. 125, в) или ротаметр РЭД и преобразователь НП-ПЗ (рис. 125, г) и т. п.

Применение «Ремиконта» не устраняет необходимости в приборах для регистрации регулируемых параметров. По этим приборам ведут настройку регуляторов и при необходимости ручное дистанционное управление процессом. Унификация входных сигналов «Ремиконта» позволяет применять однотипные одно- и многоточечные приборы типа КСУ для измерения постоянного тока в диапазоне 0—5 мА.



Рис. 125. Примеры измерительных цепей регулятора „Ремиконт“:

а — с термометром сопротивления; б — с термопарой; в — с диафрагмой; г — с ротаметром.



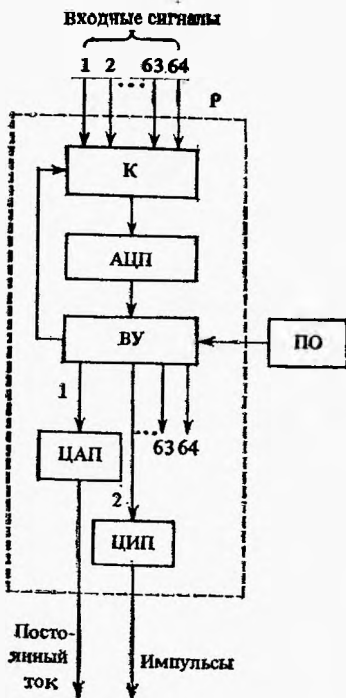


Рис. 126. Структурная схема регулятора „Ремиконт“:

Р — регулятор; ПО — пульт оператора; ВУ — вычислительное устройство; К — коммутатор, преобразователь;  
 АЦП — аналого-цифровой преобразователь;  
 ЦАП — цифроаналоговый преобразователь;  
 ЦИП — цифроимпульсный преобразователь.

Регулятор «Ремиконт» состоит из двух частей: собственно регулятора Р и пульта оператора ПО (рис. 126). Все логические операции в вычислительном устройстве ВУ регулятора выполняются в цифровой форме. Поэтому входные аналоговые сигналы регулятора предварительно преобразуются в цифровые сигналы. Для этого служит аналого-цифровой преобразователь АЦП.

Так как выходные сигналы вычислительного устройства также имеют цифровую форму, то для их преобразования в выходные аналоговые сигналы на выходе регулятора имеются преобразователи двух видов. Одни из них — цифроаналоговые ЦАП — преобразуют цифровой выходной сигнал вычислительного устройства в постоянный ток с диапазоном изменения 0—5 мА. Другие — цифроимпульсные ЦИП — в электрические импульсы различной длительности.

Входные сигналы «Ремиконта» поступают на коммутатор К, который поочередно подключает их к аналого-цифровому преобразователю АЦП. Частота работы коммутатора и очередность опроса входных сигналов вводятся оператором в вычислительное устройство с пульта ПО.

Коммутатор подключает входные сигналы на короткие промежутки времени (десятки микросекунд). За это время входной сигнал обрабатывается в вычислительном устройстве по заданному закону регулирования и выдается на соответствующий выход регулятора. Таким образом, каждый вход и соответствующий ему выход относится к одному контуру регулирования, а весь многоканальный регулятор представляет собой совокупность отдельных простых регуляторов.

В «Ремиконте» предусмотрен универсальный закон регулирования — ПИД-закон, из которого выбором коэффициентов при П-, И- и Д-составляющих можно получать любой требуемый для данной АСР типовой закон регулирования. Это производит оператор путем задания с пульта ПО требуемых коэффициентов для каждого канала многоканального регулятора.

В «Ремиконте» предусмотрен универсальный закон регулирования — ПИД-закон, из которого выбором коэффициентов при П-, И- и Д-составляющих можно получать любой требуемый для данной АСР типовой закон регулирования. Это производит оператор путем задания с пульта ПО требуемых коэффициентов для каждого канала многоканального регулятора.

«Ремиконт» позволяет также производить нелинейные преобразования сигналов (например, возведение в квадрат сигнала расходомера переменного перепада давления), сигнализировать превышение максимально допустимой величины рассогласования, организовать связи между отдельными каналами для реализации комбинированных АСР. Все эти возможности «Ремиконта» оператор может реализовать путем ввода с пульта определенных команд.

Для повышения надежности многоканального регулятора в нем предусмотрено «горячее» резервирование: при возникновении неисправности в одном из каналов регулирования автоматически включается в работу резервный канал, причем неисправность выявляется самим регулятором без участия оператора.

Применение коммутатора К позволило использовать для всех каналов один АЦП. На выходе «Ремиконта» коммутация сигналов не предусмотрена и общее число ЦАП и ЦИП равно числу выходных цепей. Это связано с тем, что при использовании одного ЦАП или одного ЦИП пришлось бы применить специальные устройства для сохранения выходных сигналов на время, пока коммутатор подключается к другим выходам.

Цифроаналоговые выходные преобразователя ЦАП предназначены для управления пневматическими исполнительными механизмами, которые подключают к выходу «Ремиконта» через электропневматический преобразователь ЭПП-63 и байпасную панель дистанционного управления БПДУ. Эта панель позволяет подавать на исполнительный механизм командное давление сжатого воздуха  $p_k$  в диапазоне  $(0,2-1) \cdot 10^5$  Па от ЭПП-63 в режиме автоматического управления (рис. 127, а) или от задатчика 1 в режиме ручного управления (рис. 127, б). Выбор режима управления производится поворотом переключателя 3. В первом случае задатчиком 1 по манометру 2 устанавливается давление питания  $p_{пит}$  преобразователя ЭПП-63 —

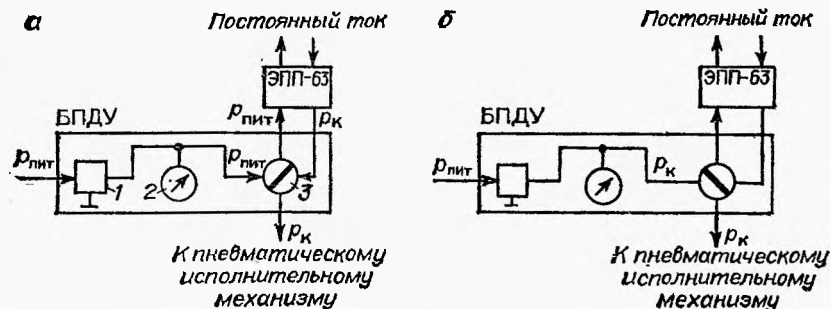


Рис. 127. Схема соединения регулятора «Ремиконт» с пневматическим исполнительным механизмом:

а — режим «автоматическое управление»; б — режим «ручное управление»; БПДУ — байпасная панель дистанционного управления; ЭПП-63 — электропневмопреобразователь; 1 — задатчик; 2 — манометр; 3 — переключатель режима управления.

1,4·10<sup>5</sup> Па. Во втором — оператор устанавливает задатчиком давление  $p_k$  на исполнительном механизме таким образом, чтобы показания измерительного прибора соответствовали заданной величине регулируемого параметра.

Цифроимпульсные преобразователи ЦИП предназначены для управления электрическими исполнительными механизмами ЭИМ, которые подключают к выходу «Ремиконта» через тиристорные пускатели. Схема управления в этом случае аналогична представленной на рис. 119.

В регуляторе «Ремиконт» все операции с сигналами АСР (вычисление рассогласования, выработка регулирующего воздействия в соответствии с законом регулирования, выполнение математических операций и т. п.) производятся в цифровой форме. В таких случаях говорят о непосредственном цифровом управлении процессом (НЦУ). Пульт оператора имеет клавиши с надписями, принятыми для регулирующих устройств. Это позволяет оператору общаться с регулятором, который представляет собой фактически микро-ЭВМ, на понятном ему языке.

### Контрольные вопросы

1. В чем отличие регулятора «Ремиконт» от управляющей вычислительной машины (УВМ)? В чем сходство между ними?
2. Составьте измерительную цепь регулятора «Ремиконт» с уровнемером, с манометром.
3. Почему на выходе регулятора «Ремиконт» не применен коммутатор?
4. Каково назначение байпасной панели дистанционного управления (БПДУ)? Какой элемент в схеме управления электрическим исполнительным механизмом выполняет ту же функцию?

### § 32. РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ

Регулирующий орган осуществляет регулирующее воздействие на объект изменением расхода вещества или энергии, подводимой к нему.

Для изменения расхода жидкостей, газов и паров применяют дроссельные регулирующие органы. Их действие основано на изменении проходного сечения трубопровода в месте установки регулирующего органа. Проходное сечение дроссельного регулирующего органа изменяют, открывая или закрывая его. Расход вещества через такой регулирующий орган зависит от степени его открытия и перепада давлений на нем. Поэтому следует иметь в виду, что даже при одной и той же степени открытия дроссельного регулирующего органа расход через него может изменяться при изменении перепада давлений.

К числу дроссельных регулирующих органов относятся односедельные, двухседельные и диафрагмовые клапаны, а также заслонки.

В односедельных и двухседельных регулирующих клапанах (рис. 128) изменение проходного сечения произ-

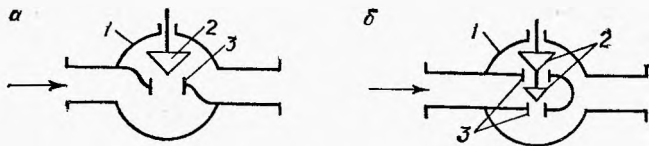


Рис. 128. Регулирующие клапаны:  
*a* — односедельный; *b* — двухседельный;  
 1 — корпус; 2 — плунжер; 3 — седло.

водится перемещением одного или двух плунжеров 2 относительно седла 3. Преимущество односедельного клапана перед двухседельным в том, что он обеспечивает при закрытии герметичное перекрытие трубопровода, в то время как у двухседельного невозможно обеспечить герметичную посадку в седла одновременно обоих плунжеров. С другой стороны, перепад давлений на клапане создает на плунжере односедельного клапана выталкивающее усилие, достигающее максимальной величины при полностью закрытом клапане. У двухседельного же клапана такие силы приложены к обоим плунжерам, но направлены в разные стороны. Поэтому результирующее усилие на штоке такого клапана даже при полном закрытии гораздо меньше, чем у односедельного, и для перемещения двухседельного клапана требуется исполнительный механизм меньшей мощности, чем для односедельного.

В диафрагмовых клапанах (рис. 129) проходное сечение изменяется в результате перемещения центра диафрагмы 2 относительно перегородки 3 в корпусе клапана 1. Конструкция корпуса позволяет покрывать его внутреннюю поверхность антикоррозионными материалами.

В трубопроводах большого сечения для управления потоками газа и пара обычно применяют поворотную заслонку (рис. 130). Основным элементом заслонки — круглый диск 1, укрепленный на оси 2 и помещенный в корпусе 3. Поворотом диска изменяется площадь проходного сечения между заслонкой и корпусом. Если диск находится в плоскости, перпендикулярной к оси корпуса, то проходное сечение равно нулю. По мере поворота диска площадь проходного сечения увели-

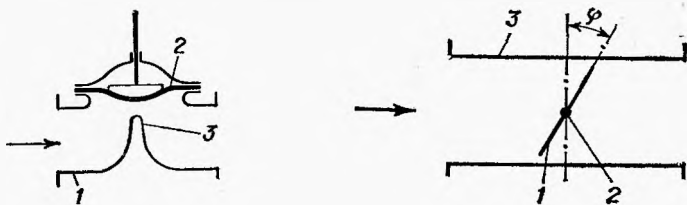


Рис. 129. Диафрагмовый клапан:  
 1 — корпус; 2 — диафрагма; 3 — перегородка.

Рис. 130. Поворотная заслонка:  
 1 — диск; 2 — ось; 3 — корпус.

чивается и достигает максимума, когда положение диска совпадает с осью корпуса.

Основной характеристикой дроссельного регулирующего органа как элемента АСР является его *статическая (расходная) характеристика* — зависимость расхода вещества через регулирующий орган (выходной сигнал) от степени его открытия (входной сигнал).

Для регулирующего органа предпочтительна линейная статическая характеристика, так как только в этом случае не искажается закон регулирования, формируемый регулятором в АСР. Однако, как указывалось выше, расход через дроссельный регулирующий орган зависит еще и от перепада давлений, который в технологическом процессе может изменяться с изменением расхода. Поэтому статическая характеристика регулирующего органа, линейная при постоянном перепаде давлений, может оказаться нелинейной в реальных условиях.

Чтобы избежать этого, применяют клапаны не только с линейными, но и с нелинейными характеристиками при постоянном перепаде давлений. Таким образом удается скомпенсировать нелинейность реальной статической характеристики регулирующего органа, обусловленную переменным перепадом давлений.

Для дроссельных регулирующих органов необходимая статическая характеристика наиболее просто может быть получена у регулирующего клапана. В настоящее время промышленность выпускает регулирующие клапаны с линейной, логарифмической и параболической характеристиками, причем клапаны с различными характеристиками отличаются лишь формой плунжера.

Кроме статической характеристики регулирующий клапан характеризует его *пропускная способность* — расход воды через полностью открытый регулирующий орган при перепаде давлений на нем  $1 \cdot 10^5$  Па. Этот расход (в  $\text{м}^3/\text{ч}$ ) указывается в паспортных данных регулирующего органа вместе с другими его показателями: условным давлением, допустимой температурой и т. п.

Регулирующий орган выбирают по пропускной способности, ввиду требуемой статической характеристики, а также исходя из условий его эксплуатации: свойств протекающей среды, температуры и давления в трубопроводе.

Для трубопроводов небольшого диаметра (до 25 мм) применяют односедельные регулирующие клапаны, большого диаметра — двухседельные.

В тех случаях, когда условия эксплуатации не позволяют применять регулирующие клапаны, используют диафрагмовые клапаны. Например, их применяют для изменения расхода сильноагрессивных жидкостей. Диафрагмы в таких клапанах изготавливают из кислотостойкой резины, фторопласта и других материалов, стойких по отношению к протекающей среде, а внутреннюю поверхность корпуса покрывают фторопластом или эмалью.

## Контрольные вопросы

1. Как влияет изменение давления до или после дроссельного регулирующего органа на его статическую характеристику (зависимость расхода от степени открытия)?
2. В чем достоинство и недостаток односедельного регулирующего клапана перед двухседельным?
3. Какой из дроссельных клапанов применяют для регулирования расхода агрессивной среды?
4. По каким параметрам выбирают регулирующий орган?

### § 33. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Исполнительный механизм преобразует выходной сигнал регулятора в перемещение регулирующего органа.

По виду используемой энергии исполнительные механизмы делятся на пневматические, гидравлические и электрические. В химической промышленности наибольшее применение получили пневматические и электрические исполнительные механизмы.

**Пневматические исполнительные механизмы.** Эти механизмы (рис. 131) преобразуют входное давление  $p$  в прогиб мембраны 1 и перемещение  $l$  связанного с ней штока 6. Мембрана (обычно резинотканевая) герметично заделана по краю между верхней 3 и нижней 4 крышками. Центральная часть мембраны опирается на жесткий центр 2. Благодаря противодействию пружины 5 статическая характеристика исполнительного механизма, т. е. зависимость перемещения  $l$  от давления  $p$ , линейна.

Обычно пневматические исполнительные механизмы применяют для управления регулирующими клапанами и их выпускают как одно устройство — пневматический регулирующий клапан. Имеется два вида пневматических регулирующих клапанов: «нормально открытые» (НО) и «нормально закрытые» (НЗ). У первых (рис. 132, а) при отсутствии давления воздуха

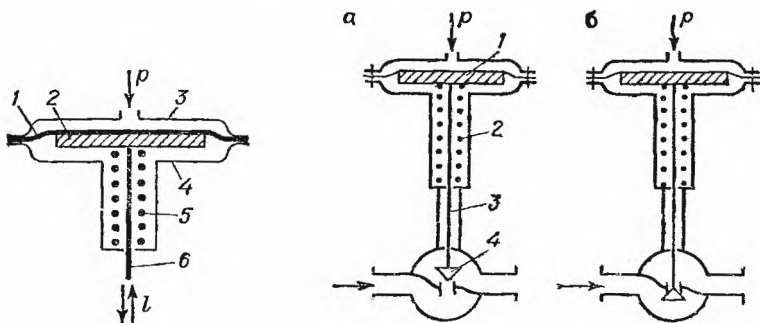


Рис. 131. Мембранный исполнительный механизм:

1 — мембрана; 2 — жесткий центр, 3, 4 — крышки; 5 — пружина; 6 — шток.

Рис. 132. Пневматический регулирующий клапан:

а — «нормально открытый» (НО); б — «нормально закрытый» (НЗ);  
1 — мембрана; 2 — пружина; 3 — шток; 4 — плунжер.

над мембраной 1 шток 3 под действием пружины 2 переходит в крайнее верхнее положение и плунжер 4 при этом полностью открывает клапан. С повышением давления воздуха проходное сечение такого клапана уменьшается. У вторых (рис. 132, б) при отсутствии давления воздуха проходное сечение полностью перекрыто и клапан открывается лишь при появлении давления над мембраной.

Клапаны типа НО применяют в тех случаях, когда при аварийном прекращении подачи воздуха открытый клапан более безопасен по технологическим условиям, чем закрытый. Например, при регулировании температуры реактора, в котором возможно затвердевание вещества, следует использовать клапан НО. При отсутствии сжатого воздуха такой клапан полностью открывается и температура в реакторе не падает ниже допустимого значения. Если же в этом случае установить клапан НЗ, то он закроется и подача пара прекратится. В ректификационной колонне на линиях подачи сырья и теплоносителя для его подогрева, а также линиях отбора продуктов ставят клапаны НЗ, а на паропроводе куба колонны и линии орошения ее верхней части — клапаны НО. Такой выбор регулирующих клапанов позволяет при отсутствии сжатого воздуха работать в режиме, при котором после возобновления подачи воздуха можно быстрее ввести колонну в рабочее состояние.

При работе в составе пневматического регулирующего клапана мембранный исполнительный механизм не может обеспечить линейность статической характеристики. Это объясняется тем, что перемещению штока при изменении командного давления будут препятствовать силы трения в сальнике, которые зависят от силы его затяжки и качества смазки. В результате одному и тому же командному давлению может соответствовать разная степень открытия клапана. Чтобы обеспечить линейность статической характеристики даже при сильной затяжке сальника, исполнительные механизмы снабжают позиционером. Это устройство позволяет охватить исполнительный механизм отрицательной обратной связью и превратить его в астатическую следящую систему.

Принципиальная схема позиционера, который устанавливается на крышке мембранного исполнительного механизма, приведена на рис. 133, а. Входное давление  $p$  подают в глухую камеру А, которая образована двумя мембранами 1 и 2, соединенными в мембранный блок. Мембранный блок через шток 3 управляет перемещением  $l_1$  золотника 4. В камеру Г подают сжатый воздух с давлением  $p_{\text{пит}} = 2,5 \cdot 10^5$  Па; из камеры В давление  $p_1$  передается на мембрану исполнительного механизма б; камера Б связана с атмосферой.

Положение золотника 4 определяет давление  $p_1$ , действующее на мембрану исполнительного механизма. При смещении золотника вниз это давление уменьшается за счет частичного стравливания воздуха через камеру В в атмосферу, при сме-

шении вверх давление на мембране увеличивается за счет большего притока воздуха из камеры Г. Положение золотника определяется состоянием мембранного блока, равновесие которого наступает при равенстве сил, создаваемых давлением  $p$  на мембранах 1 и 2 и пружиной 5. При увеличении этого давления баланс сил нарушается и мембранный блок смещается вверх (в сторону большей мембраны 1), давление  $p_1$  увеличивается, что приводит к перемещению исполнительного механизма вниз. Одновременно происходит сжатие пружины 5. В момент нового равенства сил на мембранном блоке перемещение золотника 4 и увеличение давления  $p_1$  прекратится и исполнительный механизм остановится.

Рассмотрим работу позиционера по его структурной схеме (рис. 133, б). Из этой схемы видно, что позиционер представляет собой последовательное соединение двух преобразователей, один из которых преобразует входное давление  $p$  в силу  $F$ , создаваемую мембранным блоком; другой является следящей системой, преобразующей эту силу в перемещение  $l$  исполнительного механизма. Шток 3 выполняет функции сумматора С сил  $F$  и  $F_1$ , создаваемых мембранным блоком 1, 2 и пружиной 5, и интегратора И. Положение штока определяет давление  $p_1$ , которое исполнительным механизмом 6 преобразуется в перемещение его штока  $l$ . При этом происходит сжатие пружины 5, которая замыкает цепь обратной связи.

Наличие интегратора в следящей системе делает ее астатической, поэтому характеристика обратного преобразователя — пружины 5 — определяет статическую характеристику всей следящей системы: она будет линейной. Таким образом, позиционер позволяет охватить мембранный исполнительный механизм отрицательной обратной связью по его выходному сигналу — перемещению. Это обеспечивает стабильность статической характеристики исполнительного механизма при любых условиях его эксплуатации.

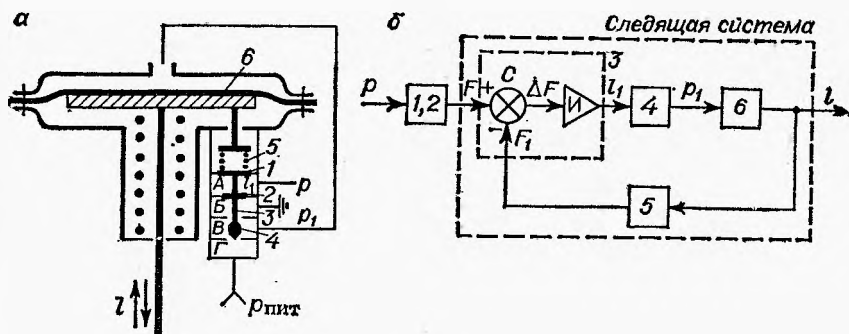


Рис. 133. Позиционер:

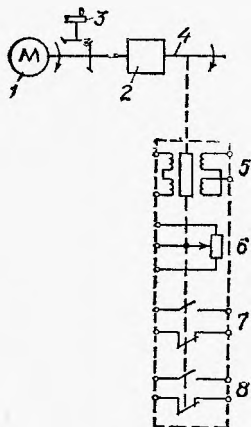
а — принципиальная схема; б — структурная схема;

1, 2 — мембраны; 3 — шток; 4 — золотник; 5 — пружина; 6 — мембранный исполнительный механизм.



Рис. 134. Электрический исполнительный механизм:

1 — электродвигатель; 2 — редуктор; 3 — маховик; 4 — выходной вал исполнительного механизма; 5 — дифференциально-трансформаторный преобразователь; 6 — реостатный преобразователь; 7 — концевые выключатели; 8 — путевые выключатели.



**Электрические исполнительные механизмы.** Эти исполнительные механизмы должны обеспечивать перемещение регулирующего органа по командам, поступающим от электрического регулятора при автоматическом управлении или от оператора — при ручном дистанционном управлении.

При поступлении команды исполнительный механизм перемещается с постоянной скоростью. Однако благодаря импульсному

режиму работы средняя скорость выходного вала исполнительного механизма оказывается переменной. Различные типы исполнительных механизмов отличаются величиной крутящего момента на выходном валу и скоростью его поворота при включенном электродвигателе.

В состав электрического исполнительного механизма (рис. 134) обычно входят следующие основные элементы: реверсивный электродвигатель, ручной привод, концевые и путевые выключатели, тормозное устройство и датчик положения выходного вала. Электродвигатель 1 с редуктором 2 служит для преобразования электрической энергии в механическую, достаточную для перемещения регулирующего органа. Маховик 3 необходим для перемещения выходного вала 4 исполнительного механизма вручную при выходе из строя тиристорного пускателя или электродвигателя.

В исполнительном механизме имеются вспомогательные устройства, обеспечивающие преобразование угла поворота выходного вала 4 в электрические сигналы различного назначения. Дифференциально-трансформаторный преобразователь 5 служит для введения в регулятор сигнала обратной связи, пропорционального углу поворота выходного вала исполнительного механизма или, что то же самое, степени открытия регулирующего органа  $\mu_{ср}$  (см. рис. 117).

Выходной сигнал реостатного преобразователя 6 используется для работы дистанционного указателя положения исполнительного механизма, устанавливаемого на щите оператора рядом с кнопками ручного дистанционного управления. Концевые выключатели 7 выполняют защитные функции. Они отключают тиристорный пускатель при достижении регулирующим органом крайних положений. Путевые выключатели 8 служат для ограничения диапазона перемещения регулирующего органа. В автоматическом режиме работы они отключают пускатель при выходе за пределы установленного диапазона,

Тормозное устройство в исполнительных механизмах необходимо для уменьшения выбега выходного вала после прекращения действия управляющих импульсов. Обычно тормозное устройство снабжается электромагнитным приводом, который работает следующим образом: при появлении силового напряжения на электродвигателе появляется ток и в обмотке электромагнита. Якорь втягивается и отводит тормозную колодку от вала электродвигателя. При исчезновении силового напряжения электромагнит обесточивается и вал электродвигателя тормозится тормозной колодкой, которая прижимается к нему пружиной.

### Контрольные вопросы

1. Какой тип регулирующего клапана (НО или НЗ) следует применить на линии питания парового котла водой?
2. Для чего предназначен позиционер? Каким образом он обеспечивает независимость статической характеристики пневматического исполнительного механизма от усилия, создаваемого на штоке регулирующего органа?
3. Влияет ли изменение давления, питания в камере Г позиционера (рис. 133, а) на его работу?
4. Каково назначение концевых выключателей в ЭИМ? путевых выключателей?
5. Как в ЭИМ обеспечивается уменьшение выбега выходного вала после включения управляющего напряжения?

### § 34. ОСОБЫЕ ВИДЫ АСР

При автоматизации процессов химической промышленности чаще всего возникают задачи стабилизации автоматически измеряемых режимных технологических параметров возле их заданных значений. Такие задачи, как мы видели, решаются одноконтурными АСР по отклонению или комбинированными АСР. Однако этим не исчерпывается многообразие задач и способов регулирования технологических процессов. Так, регулируемый параметр может не измеряться непосредственно, а вычисляться по результатам измерений других параметров, или его заданное значение может быть заранее не известным и должно отыскиваться самой системой регулирования. Иногда регулирующее воздействие по техническим причинам не может изменяться непрерывно и принимать любое требуемое значение, а возможны лишь два его значения: минимальное и максимальное, открыто — закрыто, включено — выключено и т. п.

Для решения таких задач применяют специальные АСР, основные из которых рассмотрены ниже.

**АСР с позиционным регулированием.** В процессах химической технологии регулирующими параметрами обычно бывают материальные потоки сырья, полуфабрикатов, энергоносителей (пара, хладагента) и др. Изменение таких потоков производят с помощью клапанов, заслонок, задвижек, кранов и других регулирующих органов. Иногда не удается или затруднительно

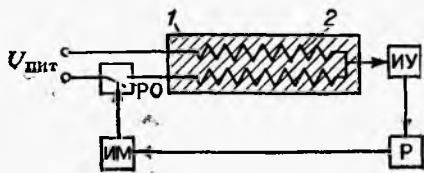


Рис. 135. Двухпозиционная АСР температуры:

ИУ — измерительное устройство, Р — регулятор, ИМ — исполнительный механизм, РО — регулирующий орган; 1 — плита; 2 — электрический нагреватель.

применить регулирующий орган, плавно изменяющий расход в трубопроводе. Например, на абразивных пульсах или агрессивных средах обычные регулирующие органы быстро изнашиваются или разрушаются. В некоторых случаях нежелательны потери давления в трубопроводе на регулирующем органе. Часто оказывается проще вместо плавного регулирования потока в трубопроводе просто включать или выключать насос. Наконец, в процессах с электрическим нагревом, как правило, подаваемую на нагрев электроэнергию не регулируют плавно, а только включают или выключают электронагрев в зависимости от значения регулируемой температуры.

Всем подобным примерам свойственна одна особенность — позиционное изменение регулирующего параметра. Если регулирующий параметр может принимать только одно из двух возможных значений (включено — выключено, открыто — закрыто и т. п.), то соответствующий регулятор и вся АСР называются двухпозиционными. Понятно, что ограничение регулирующего воздействия на объект только двумя возможными значениями регулирующего параметра ухудшает качество регулирования в АСР.

Рассмотрим работу двухпозиционной АСР на примере регулирования температуры плиты пресса для производства пластмассовых изделий (рис. 135). В плиту 1 вмонтирован электрический нагреватель 2, подключенный к силовой электросети через выключатель, который является регулирующим органом РО. Управление выключателем (включение или выключение) производится электромагнитом исполнительного механизма ИМ.

Температура плиты измеряется термопарой в комплекте с автоматическим потенциометром, образующими измерительное устройство ИУ. Результат измерения температуры передается в регулятор Р, который управляет исполнительным механизмом. При опускании температуры ниже заданной нагреватель включается, а при превышении заданной температуры — выключается.

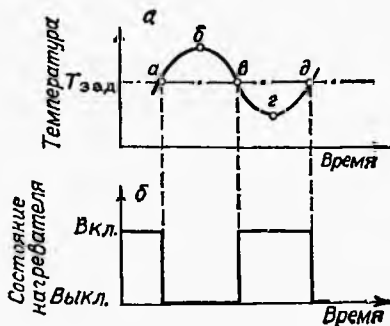
Чтобы термопара измеряла среднюю температуру плиты, ее заглубляют в плиту, но не слишком близко к нагревателю. Сама плита с нагревателем как объект регулирования обладает значительной тепловой инерцией и запаздыванием выходного сигнала. При нагреве плиты, когда нагреватель включен, повышение температуры происходит постепенно, от центра к поверхности. Поэтому термопара реагирует на включение нагревателя с запаздыванием. Точно так же при остывании плиты, когда нагреватель выключен, снижение температуры распро-

Рис. 136. Переходные процессы в двухпозиционной АСР:

*a* — изменение температуры ( $T_{\text{зад}}$  — заданная температура); *b* — изменение состояния нагревателя.

страняется от поверхности к центру и не сразу улавливается термопарой.

На рис. 136 показаны переходные процессы изменения во времени температуры плиты в месте установки термопары и напряжения нагревателя. При включенном нагревателе измеренная температура повышается, и когда она сравнивается с заданной (точка *a*), регулятор выключает нагреватель. Однако вследствие явления запаздывания в объекте температура сначала продолжает расти, достигает некоторого максимального значения (точка *b*) и только после этого начинает уменьшаться. При достижении заданной температуры (точка *в*) снова включается нагреватель и все происходит в обратном порядке. Температура по инерции проскакивает заданное значение, достигает минимальной величины (точка *г*) и затем увеличиваясь, проходит заданное значение температуры в точке *д*. Далее этот цикл повторяется.



Как видно, в рассмотренной двухпозиционной АСР возникают незатухающие колебания температуры возле заданного значения. Такой процесс регулирования характерен для любой позиционной АСР.

Период колебаний (промежуток времени между точками *a* и *д*) зависит от инерции объекта: чем она больше, тем больше период колебаний регулируемого параметра. Амплитуда же колебаний в основном определяется запаздыванием в объекте и с его увеличением растет. В малоинерционных объектах период колебаний может оказаться настолько малым, что регулирующий орган будет быстро изнашиваться из-за частого срабатывания. Это особенно заметно например, когда воздействие на объект производится включением и выключением насоса на трубопроводе регулирующего потока.

Чтобы избежать частого переключения регулирующего органа, в подобных случаях в регуляторе вводят зону нечувствительности. Работу АСР с таким регулятором рассмотрим на примере регулирования уровня в баке 1 (рис. 137) включением или выключением насоса 2, откачивающего жидкость. Зависимости изменения

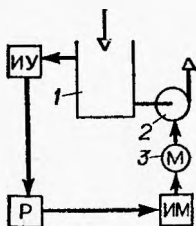


Рис. 137. Двухпозиционная АСР уровня:  
1 — бак; 2 — насос; 3 — электродвигатель.

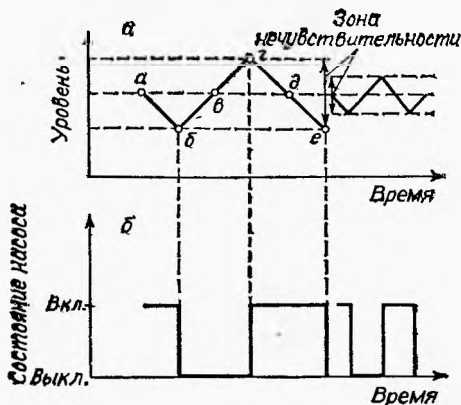


Рис. 138. Переходные процессы в двухпозиционной АСР с зоной нечувствительности:

а — изменение уровня; б — изменение состояния насоса.

во времени уровня и режима работы насоса приведены на рис. 138.

При включенном насосе уровень уменьшается и доходит до заданного значения (точка а). Однако насос остается включенным и поэтому уровень продолжает снижаться. Выключение насоса произойдет лишь

тогда, когда уровень в баке достигнет определенного значения ниже заданной величины (точка б). После этого уровень начинает расти и проходит заданное значение (точка в). При этом насос включится, лишь когда уровень достигнет определенного значения выше заданного (точка г). Далее процесс будет повторяться.

Особенности работы такой системы, в отличие от рассмотренной выше, заключается в том, что включение и выключение насоса происходит не тогда, когда уровень проходит заданное значение, а когда он уже отклонился от него на заранее установленное значение. Уровни, при которых переключается насос (точки б и г), называются границами зоны нечувствительности, а расстояние между ними — величиной зоны.

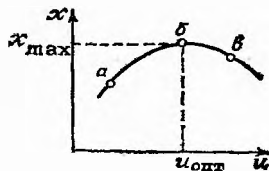
Для сравнения на этом рисунке справа показана работа системы с меньшей зоной нечувствительности. Видно, что частота переключений насоса увеличилась.

Таким образом, увеличение зоны нечувствительности в двухпозиционной АСР позволяет снизить частоту срабатываний регулирующего органа, но при этом ухудшается точность регулирования — регулируемый параметр больше отклоняется от заданного значения.

**Экстремальные АСР.** До сих пор мы имели дело с объектами регулирования, у которых статическая характеристика — зависимость выходного сигнала (регулируемого параметра) от входного (регулирующего параметра) — была такова, что увеличение регулирующего параметра приводило либо только к увеличению, либо только к уменьшению регулируемого параметра. Так, при регулировании температуры в реакторе подачи греющего пара увеличение расхода пара всегда приводит к росту температуры. Такая зависимость называется *монотонной*, и это свойство объекта является отличительным признаком стабилизирующих систем. Благодаря этому обратная связь в АСР остается отрицательной во всем возможном диапазоне изменения регулируемого параметра.

Рис. 139. Экстремальная статическая характеристика объекта регулирования:

$x$  — регулируемый параметр (температура продуктов сгорания);  $x_{\max}$  — максимальное значение регулируемого параметра;  $u$  — регулирующий параметр (расход воздуха);  $u_{\text{опт}}$  — оптимальное значение регулирующего параметра.



Однако встречаются объекты регулирования, у которых зависимость выходного сигнала от входного не монотонная. Примером такого объекта является топка, в которой сжигают газ. Для полного сгорания газа в топку подают воздух. Температура продуктов сгорания зависит от соотношения расходов газа и воздуха. При постоянном расходе газа увеличение расхода воздуха сначала приводит к росту температуры. Это объясняется увеличением полноты сгорания газа (при недостатке воздуха сгорает не весь газ). При дальнейшем увеличении расхода воздуха температура достигает максимума (газ сгорает полностью), а затем начинает снижаться. Снижение температуры объясняется тем, что часть тепла продуктов сгорания тратится на нагрев избыточного воздуха.

Описанная зависимость регулируемого параметра (температуры продуктов сгорания) от регулирующего (расхода воздуха при постоянном расходе газа) называется *экстремальной статической характеристикой* объекта (рис. 139). Значение регулирующего параметра, которое соответствует максимальной величине регулируемого параметра, называется *оптимальным*.

Рассмотрим, что получится, если попытаться поддерживать максимальную температуру продуктов сгорания с помощью обычной стабилизирующей АСР. Предположим, что в какой-то момент температура ниже максимальной, а расход воздуха меньше его оптимального значения (точка  $a$  на рис. 139). Ясно, что в этом случае для повышения температуры (регулируемый параметр), т. е. для устранения рассогласования на входе регулятора, расход воздуха (регулирующий параметр) нужно увеличить. Допустим, что регулятор стабилизирующей АСР так и действует. В результате температура поднимется до максимального значения, а расход воздуха станет оптимальным (точка  $b$ ). Однако если температура проскочит максимальное значение, например, вследствие тепловой инерции топки (точка  $в$ ), то дальнейшие действия регулятора будут «неправильными». Действительно, регулятор в ответ на снижение температуры снова увеличит расход воздуха. Но, как видно из рисунка, теперь это приведет к еще большему снижению температуры. Получается, что при переходе через точку  $b$  слева направо отрицательная обратная связь меняется на положительную и АСР становится неработоспособной (температура будет уменьшаться до тех пор, пока газовый факел не погаснет).

Таким образом, для объектов с экстремальной статической характеристикой способ регулирования по отклонению не

годится. Более того, как правило, и максимальная величина регулируемого параметра, и соответствующее ей оптимальное значение регулирующего параметра заранее не известны или непредсказуемо изменяются под действием различных возмущений. В рассматриваемом примере максимальная температура и оптимальный расход воздуха зависят от калорийности сжигаемого газа, которая может случайно изменяться.

Чтобы использовать принцип обратной связи для управления объектами с экстремальной статической характеристикой, необходимо знать, в какую сторону следует изменять регулирующий параметр для приведения регулируемого параметра к его максимальному значению, т. е. знать, по какую сторону от точки  $b$  на рис. 139 находится точка, отображающая состояние системы в данный момент (например, в точке  $a$  или в точке  $b$ ). Для этого используют хорошо известный нам из жизни способ пробного воздействия и анализа отклика на него. В нашем случае это означает, что необходимо произвести небольшое пробное изменение регулирующего параметра, например, в сторону его увеличения, и выяснить, увеличивается или уменьшается при этом величина регулируемого параметра. Если она увеличивается, то регулирующий параметр следует продолжать изменять в ту же сторону, а если уменьшается, то направление изменения регулирующего параметра, очевидно, необходимо поменять на противоположное.

Регулятор, в котором автоматически осуществляются пробные воздействия на объект регулирования и определяется правильное направление изменения регулирующего параметра, называется экстремальным, а АСР с таким регулятором — экстремальной.

Процедура автоматического поиска максимума регулируемого параметра в экстремальной АСР на примере сжигания газа в топке показана на рис. 140.

Пусть в некоторый момент времени расход воздуха и температура продуктов сгорания соответствуют точке  $a_0$ . После пробного шага — увеличения расхода воздуха — температура



Рис. 140. Автоматический поиск максимума в экстремальной АСР сжигания газа в топке при постоянной статической характеристике объекта.

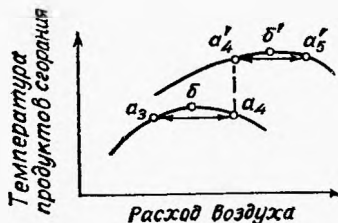


Рис. 141. Автоматический поиск максимума в экстремальной АСР сжигания газа в топке при изменении статической характеристики объекта.

возрастет (точка  $a_1$ ). Тогда регулятор снова увеличит расход воздуха, что, в свою очередь, вызовет новое увеличение температуры (точка  $a_2$ ). Таким образом, температура будет «шагами» приближаться к максимальному значению (точке  $b$ ). Однако после точки  $b$  при очередном увеличении расхода воздуха температура уменьшится (точка  $a_4$ ). Регулятор отреагирует на это и сделает очередной шаг в противоположную сторону — уменьшит расход воздуха. При этом, как видно из рисунка, состояние системы управления будет отображаться точкой  $a_3$ , находящейся слева от точки  $b$ . Поэтому опять повторится шаг в сторону увеличения расхода воздуха и т. д. Возникнут колебания расхода воздуха и температуры возле точки искомого максимума температуры — точки  $b$ . Такие колебания характерны для любой экстремальной АСР, в которой производится шаговый поиск максимума регулируемого параметра.

Наличие колебаний в системе не позволяет достигнуть точного максимума (точки  $b$ ), тем не менее они необходимы для нормальной работы экстремальной АСР. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим работу АСР, в случае когда экстремальная характеристика объекта изменилась (точка  $b$  переместилась в точку  $b'$ , рис. 141). Прежнее значение расхода воздуха, соответствующее точке  $b$ , теперь не будет оптимальным. Однако узнать об этом можно лишь при очередном пробном изменении расхода воздуха, т. е. при колебательном режиме работы АСР. Действительно, при очередном шаге из точки  $a_3$  в точку  $a_4$  температура возрастет (точка  $a'_4$ ), поэтому следующий шаг будет сделан уже не обратно в точку  $a_3$ , а в новую точку  $a'_5$ . В результате колебания в системе автоматически переместятся в окрестность нового максимума (точка  $b'$ ).

Как видно из описания работы экстремальной системы, ее закон управления значительно сложнее типовых законов регулирования стабилизирующих АСР. Поэтому промышленность не выпускает серийно экстремальные регуляторы, а алгоритмы управления экстремальными объектами, как правило, реализуют в цифровой форме средствами вычислительной техники.

**Адаптивные АСР.** Рассмотренные в гл. 1 системы и способы автоматического регулирования технологических параметров отличались тем, что в них по результатам непрерывных измерений регулируемых параметров объектов, а при необходимости и основных возмущений, автоматически вырабатываются такие управляющие воздействия на объект, которые позволяют всегда удерживать значение регулируемого параметра достаточно близко от заданного. Для успешного решения такой задачи необходимо, во-первых, непрерывно и точно измерять регулируемый параметр и контролируемые возмущения, а во-вторых, знать статические и динамические свойства объекта регулирования. Знание свойств объекта: его статической характеристики, постоянной времени, времени запаздывания и других по-



казателей — позволяет правильно выбрать параметры регулятора, например коэффициент передачи, время интегрирования и время предварения в ПИД-регуляторе. Как было показано в § 26, от параметров регулятора зависит качество регулирования в автоматической системе, и при неудачном их выборе может даже возникнуть неустойчивость замкнутой системы, т. е. она станет неработоспособной. Настройка регуляторов промышленных АСР по переходным процессам, по существу, сочетает экспериментальное определение свойств объекта по виду переходного процесса при стандартном входном воздействии и подбор настроечных параметров регулятора. Однако такой прием эффективен, если свойства элементов АСР (объекта регулирования, регулирующего органа, измерительного устройства) в дальнейшем не изменяются, в противном случае настройка АСР должна проводиться регулярно.

Неточность и неполнота измерительной информации, снимаемой с объекта регулирования, также отрицательно сказывается на качестве регулирования. Так, при измерении уровня жидкости в емкости буйковым уровнемером (см. рис. 52) возникает систематическая погрешность вследствие обрастания буйка, которая не может быть скомпенсирована регулятором уровня, и в соответствующей АСР уровня в емкости появится систематическая ошибка. Другим примером неточности измерительной информации является рассмотренная выше двухпозиционная АСР температуры плиты пресса для производства пластмассовых изделий. Здесь появляется динамическая ошибка при измерении температуры плиты: изменение температуры в точке установки термопары запаздывает по отношению к изменению истинной средней температуры плиты. Это приводит, как видно из рис. 136, к увеличению амплитуды колебаний температуры возле заданного значения.

Получение точной и полной измерительной информации о поведении объекта регулирования наиболее затруднено при управлении показателями состава и свойств веществ. В этих случаях, как правило, невозможно измерить интересующий нас параметр непосредственно и используются косвенные измерения. Так, для определения концентрации раствора измеряют его плотность и используют известную зависимость концентрации от плотности раствора. Если раствор многокомпонентный, то для определения концентраций отдельных компонентов приходится измерять кроме плотности раствора дополнительные параметры, такие, как электропроводность и вязкость. Точность таких косвенных измерений может оказаться недостаточной для целей управления технологическим процессом.

Таким образом, при недостаточной измерительной информации об управляемом объекте или недостаточном знании его свойств обычные способы регулирования (по отклонению или комбинированный) непригодны.

Существуют приемы, которые позволяют автоматически восполнять недостающую информацию в процессе работы АСР без использования каких-либо дополнительных измерений на объекте регулирования. Системы, в которых используются такие приемы, называются *адаптивными*. Можно сказать, что в адаптивных системах происходит автоматическое изучение характеристик объекта регулирования или восстановление сигналов по результатам измерений.

Интересно отметить, что даже в обычной астатической АСР уже имеется элемент адаптации. Действительно, астатическую АСР с интегральной составляющей в законе регулирования применяют в случаях, когда статическая характеристика объекта может изменяться во времени. При этом заданное значение регулируемого параметра в установившемся режиме получается при различных значениях регулирующего параметра, т. е. при различном значении  $z_0$  в пропорциональном законе регулирования [см. формулу (39)]. Поэтому, если ограничиться П-регулятором с постоянной величиной  $z_0$ , то в такой статической АСР при изменении статических свойств объекта будет возникать систематическая ошибка. Интегральная же составляющая регулятора астатической АСР автоматически по результатам измерений регулируемого параметра отслеживает величину  $z_0$ , которая заранее неизвестна и непосредственно не измеряется. Это и есть адаптация в системе регулирования.

В системах управления технологическими процессами наиболее распространены два способа адаптации. Первый из них включает оценивание неизвестных статических или динамических характеристик объекта регулирования. Методы и алгоритмы такого оценивания по результатам измерений называются идентификацией объекта. Так, наблюдая некоторое время за изменениями температуры смеси в реакторе и расхода пара в рубашку (см. рис. 8), можно определить коэффициент передачи реактора как объекта регулирования температуры.

Второй способ адаптации включает оценивание регулируемых технологических параметров по результатам неточных или косвенных измерений. Такое оценивание называется фильтрацией. Если, например, в измерительной цепи действуют значительные помехи, то качество управления по результатам таких измерений может оказаться низким. Чаще всего большие погрешности возникают при измерениях расходов жидкостей, перекачиваемых по трубопроводам насосами. Такие погрешности обусловлены толчками потока, создаваемыми насосом, тогда как интересующий нас средний расход может оставаться неизменным. В этом случае средний расход можно оценить путем сглаживания (фильтрации) пульсаций результатов измерений — выходного сигнала расходомера. Это — простейший вариант оценивания параметра по результатам измерений, сопровождающихся значительными помехами.

Алгоритмы адаптации могут быть различными и достаточно сложными. Поэтому их обычно реализуют в цифровой форме в управляющих вычислительных машинах.

### Контрольные вопросы

1. Какие известны особые виды АСР и в каких случаях их применяют?
2. Всегда ли в позиционных АСР возникают незатухающие колебания регулируемого параметра? Чем объясняются эти колебания?
3. Для чего в позиционных АСР вводят зону нечувствительности? Улучшается ли при этом качество регулирования?
4. Для каких объектов применяют экстремальные АСР?
5. Что произойдет, если для управления экстремальным объектом применить обычную стабилизирующую АСР?
6. Почему в экстремальной АСР возникают незатухающие колебания возле точки экстремума? Полезны ли они?
7. В каких случаях следует применять адаптивные АСР?
8. В чем заключается адаптация в астатической АСР?

## ГЛАВА VII

---

### ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

#### § 35. ГРАФИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Основным техническим документом, показывающим связи между технологическим процессом и средствами контроля и управления, является функциональная схема автоматизации, на которой с помощью условных изображений схематически показывают технологическое оборудование, трубопроводы и средства автоматизации.

Технологическое оборудование и трубопроводы автоматизированного объекта изображают на функциональной схеме упрощенно. Направление движения потоков в трубопроводах указывают стрелками. На линиях обрыва также ставят указывающие стрелки и дают необходимые пояснения, из какого аппарата и к какому направляется данный поток. Принятые обозначения трубопроводов приведены в табл. 9.

Условные обозначения средств автоматизации на функциональных схемах элементов измерительной цепи, регуляторов и станций управления, а также исполнительных механизмов — приведены в табл. 10.

В верхнюю половину окружности, обозначающей элемент измерительной цепи или регулятор, сначала записывают обозначения измеряемых или регулируемых параметров (табл. 11) и, если это необходимо, их уточнение (табл. 12), а затем —

Таблица 9. Обозначения трубопроводов

Транспортируемая среда	Условные обозначения	Транспортируемая среда	Условные обозначения
Вода	-1-1-	Жидкое горючее	-15-15-
Пар	-2-2-	Горючие и взрывоопасные газы:	
Воздух	-3-3-	водород	-16-16-
Азот	-4-4-	ацетилен	-17-17-
Кислород	-5-5-	фреон	-18-18-
Инертные газы:		метан	-19-19-
аргон	-6-6-	этан	-20-20-
неон	-7-7-	этилен	-21-21-
гелий	-8-8-	пропан	-22-22-
криптон	-9-9-	пропилен	-23-23-
ксенон	-10-10-	бутан	-24-24-
Аммиак	-11-11-	бутлен	-25-25-
Кислота	-12-12-	Противопожарный трубопровод	-26-26-
Щелочь	-13-13-	Трубопровод под разрежением	-27-27-
Масло	-14-14-		

Таблица 10. Условное обозначение средств автоматизации

Название	Обозначение
Датчик, промежуточный преобразователь, измерительный прибор, регулятор, магнитный или тиристорный пускатель и другие устройства, установленные на аппарате, трубопроводе или около них	○
Промежуточный преобразователь, измерительный прибор, регулятор, кнопка, переключатель и другие устройства, установленные на щите управления	⊖
Исполнительный механизм (пневматический, электрический и пр.)	⊙ I

обозначения основных функций, выполняемых этим устройством (табл. 13).

В табл. 14 приведены некоторые дополнительные обозначения, применяемые для конкретизации основных обозначений, входящих в табл. 13. Эти обозначения приводят на функцию-

Таблица 11. Условное обозначение параметров

Название	Обозначение	Название	Обозначение
Давление, разрежение	<i>P</i>	Влажность	<i>M</i>
Уровень	<i>L</i>	Состав, концентрация	<i>Q</i>
Расход	<i>F</i>	Несколько разнородных параметров	<i>U</i>
Температура	<i>T</i>	раметров	
Плотность	<i>D</i>	Электрическая величина	<i>E</i>
Вязкость	<i>V</i>	Время	<i>K</i>
		Положение, перемещение	<i>G</i>

Таблица 12. Условное обозначение уточнений параметров

Название	Обозначение	Название	Обозначение
Разность, перепад	$D, d$	Интегрирование	$Q, q$
Соотношение	$F, f$	Автоматическое переключение, обегание	$J$

Таблица 13. Условное обозначение основных функций средств автоматизации

Название	Обозначение
Показание	$I$
Регистрация	$R$
Регулировка управление	$C$
Дистанционное управление с помощью устройства, встроенного в измерительный прибор (например, станции управления)	$K$
Дистанционное управление с помощью отдельного (не встроенного в прибор или регулятор) устройства (например, кнопкой, ключом управления, задатчиком)	$H$
Преобразование измеряемого параметра (выходной сигнал датчика)	$E$
Дистанционная передача показаний	$T$
Преобразование сигнала (например, пневматического в электрический), выполнение вычислительных функций (например, извлечение корня)	$Y$
Сигнализация	$A$
Включение, отключение, переключение	$S$

нальной схеме справа от обозначения устройства. Расшифровка значений  $Q$  и  $U$  из табл. 11 также дается на схеме около обозначения соответствующего устройства.

Рассмотрим несколько примеров использования условных обозначений. На рис. 142, *а* изображен датчик ( $E$ ) температуры ( $T$ ). Это может быть, например, термopара, термометр сопротивления, термобаллон манометрического термометра и т. п. На рис. 142, *б* показан установленный на щите прибор для измерения температуры ( $T$ ), показывающий ( $I$ ) и регистриру-

Таблица 14. Условные обозначения дополнительных функций средств автоматизации

Название	Обозначение	Название	Обозначение
Верхнее предельное значение параметра	$H$	Пневматический сигнал	$P$
Нижнее предельное значение параметра	$L$	Извлечение корня	$\sqrt{\quad}$
Электрический сигнал	$E$	Передача сигнала на ЭВМ	$B_i$
		Вывод информации с ЭВМ	$B_0$

щий ( $R$ ), например автоматический потенциометр или мост. На рис. 142, *в* показан такой же прибор с встроенным в него регулятором ( $C$ ) и укомплектованный панелью дистанционного управления ( $HC$ ).

На рис. 143, *а* показан датчик ( $E$ ) расхода ( $F$ ), например диафрагма расходомера переменного перепада давлений или бак расходомера переменного уровня. На рис. 143, *б* — промежуточный преобразователь ( $T$ ) расходомера ( $F$ ). Это может быть дифманометр, преобразующий перепад давления на диафрагме (в первом случае) или давление столба жидкости в баке (во втором) в пневматический или электрический промежуточный сигнал. Однако это может быть и ротаметр с дистанционной передачей, у которого промежуточный преобразователь смонтирован в одном корпусе с датчиком (поплавок). На рис. 143, *в* изображен прибор, показывающий ( $I$ ) и регистрирующий ( $R$ ) величину расхода ( $F$ ), со встроенной станцией управления ( $K$ ). Вместе с прибором на шите установлен регулятор расхода ( $FC$ ).

Обычно все устройства, относящиеся к одной измерительной или регулирующей цепи, обозначают индексом с одинаковой цифрой, но разными буквами. Эти обозначения располагают в нижней половине окружности, изображающей устройство, или около исполнительного механизма.

В случаях, когда несколько элементов выпускают в виде одного устройства (например, термобаллон манометрического термометра с манометром, мембранный исполнительный механизм с регулирующим клапаном), им присваивают одно общее обозначение.

На рис. 144 приведен пример функциональной схемы автоматизации процесса нагрева кислоты горячей водой. Как видно из приведенной схемы, она содержит один контур регулирования



Рис. 142. Примеры условных изображений на функциональных схемах средств измерения и регулирования температуры:

*а* — датчик температуры; *б* — показывающий и регистрирующий прибор; *в* — показывающий и регистрирующий прибор с регулятором, укомплектованный панелью дистанционного управления.



Рис. 143. Примеры условных изображений на функциональных схемах средств измерения и регулирования расхода:

*а* — датчик расхода; *б* — датчик расхода, снабженный промежуточным преобразователем либо промежуточный преобразователь; *в* — показывающий и регистрирующий прибор с встроенной станцией управления и регулятор расхода.

ния — температуры кислоты (5а—5е). Остальные устройства предназначены для измерения расхода горячей воды (1а—1в), расхода кислоты (4а—4б), температуры воды и кислоты на входе в теплообменник (3а—3в). Кроме того, предусмотрена сигнализация при падении давления горячей воды (2).

Расположение элементов автоматизации на функциональной схеме определяется их назначением. Условные обозначения датчиков, промежуточных преобразователей, объединенных с датчиками в одно устройство, и исполнительных механизмов, т. е. всех элементов АСР, механически связанных с технологическими аппаратами и трубопроводами, помещают рядом с изображением соответствующего оборудования (1а, 3а, 3б, 4а, 5а, 5е). Более того, условные обозначения датчиков и промежуточных преобразователей расходомеров, через которые проходят технологические потоки, размещают прямо на изображениях трубопроводов, в которых измеряются расходы (1а и 4а).

Всю остальную аппаратуру автоматизации: преобразователи, измерительные приборы, регуляторы и органы управления — выносят в нижнюю часть схемы. При этом вдоль листа вычерчивают прямоугольники, условно изображающие щиты и пульты

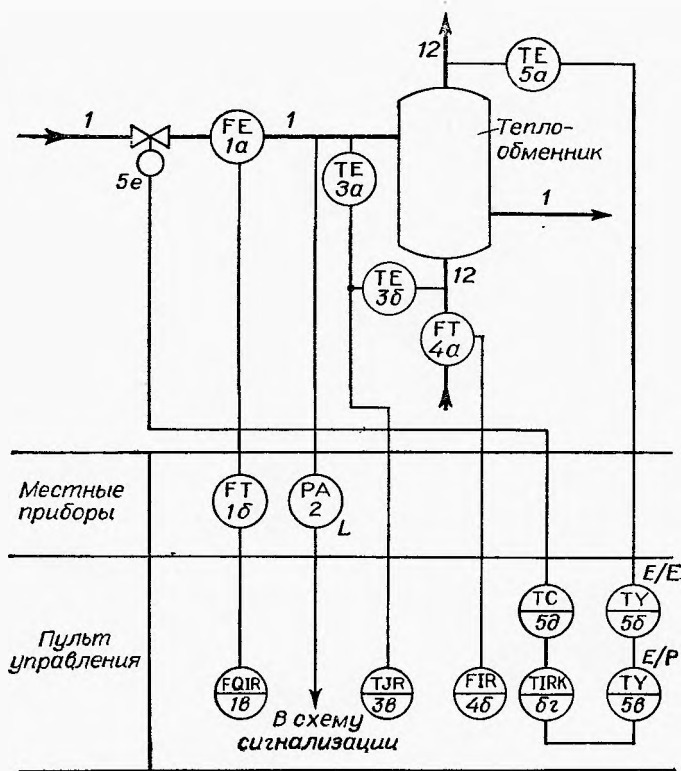


Рис. 144. Функциональная схема автоматизации процесса нагрева.

ты. В этих прямоугольниках группируют аппаратуру по принципу общности расположения. Например, все преобразователи и приборы, расположенные рядом с местом измерения, т. е. смонтированные не на технологическом оборудовании, а на стенах цеха, колоннах, на полу и т. п., располагают в одном прямоугольнике (1б, 2).

В другом прямоугольнике расположены условные обозначения аппаратуры автоматизации, размещенной на щите управления процессом (1в, 3в, 4б, 5б, 5в, 5г, 5д).

Поскольку функциональная схема автоматизации предназначена для отражения только структуры системы управления технологическим процессом, в ней не расшифровываются технические средства, использованные в конкретной схеме. Поэтому, например, в АСР температуры кислоты датчиком температуры (5а) может быть термопара или термометр сопротивления. Тогда следующим преобразователем (5б) в первом случае будет нормирующий преобразователь э. д. с. в ток (типа НП-ТЛ-1М), а во втором — электрического сопротивления в гом (типа НП-ТС-1М). Не определить по функциональной схеме также систему дистанционной передачи сигналов. Например, если для измерения расхода кислоты использован ротаметр (4а) с электрической дистанционной передачей (типа РЭД), то измерительным прибором (4б) будет прибор для измерения напряжения переменного тока (типа КСД); с ротаметром, имеющим пневматическую дистанционную передачу (типа РПД) используют прибор для измерения давления сжатого воздуха (типа ПВ). То же относится к средствам регулирования, сигнализации и т. п.

Расшифровка элементов автоматизации, изображенной на функциональной схеме, дается в спецификации, которая составляется для заказа этой аппаратуры на заводах-изготовителях. В этой спецификации по каждой позиции указывается тип устройства, его модификация, пределы измерения, требуемое количество и другие необходимые сведения.

## **§ 36. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

**Давление.** В большинстве технологических процессов требуется стабилизация давления. Поддержание давления в одних случаях обусловлено технологическим регламентом процесса, в других необходимо для преодоления различных гидравлических сопротивлений. При понижении давления ухудшаются режимные показатели технологического процесса, при повышении — возникает аварийная ситуация (разгерметизация или даже разрыв аппарата).

Регулирование давления обычно осуществляют изменением расхода вещества через аппарат на стороне подачи или потребления. Это достигается с помощью регулирующего органа,



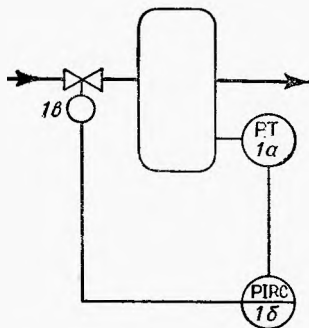


Рис. 145. Функциональная схема АСР давления.

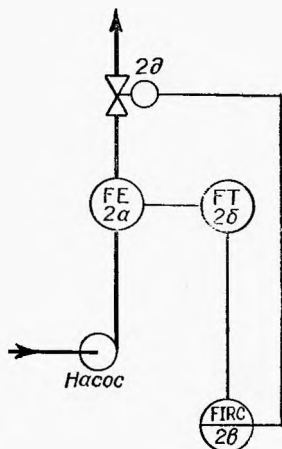


Рис. 146. Функциональная схема АСР расхода.

изменяющего гидравлическое сопротивление в линии подачи или потребления.

На рис. 145 показана схема АСР давления в реакторе. АСР состоит из первичного преобразователя давления 1а (манометр), совмещенного с промежуточным преобразователем, измерительного самопишущего прибора 1б с регулятором и регулирующего клапана с исполнительным механизмом 1в. Давление в такой системе регулируют изменением степени открытия регулирующего органа — клапана.

**Расход жидкостей и газов.** Одна из основных задач управления в химической технологии — стабилизация или изменение по определенному закону расходов материальных потоков. Поэтому системы автоматизации, как правило, включают АСР расхода жидкостей и газов.

Наиболее распространенным способом перемещения жидких и газообразных продуктов является их транспортировка по трубопроводам с помощью центробежных насосов и компрессоров. Расход в таких случаях регулируют с помощью дроссельного регулирующего органа, устанавливаемого на трубопроводе.

На рис. 146 показана схема АСР расхода, состоящая из первичного преобразователя расхода (сужающее устройство) 2а, промежуточного преобразователя перепада давлений (дифманометр) 2б, измерительного самопишущего прибора 2в с регулятором и регулирующего клапана с исполнительным механизмом 2г. В такой системе расход регулируется изменением степени открытия регулирующего органа.

При управлении многими технологическими процессами необходимо стабилизировать заданное соотношение расходов двух потоков. На рис. 147 приведена схема АСР соотношения двух потоков. Один из контуров управления, в котором расход потока  $Q_1$  стабилизируется с помощью обычной АСР (4, а, б, в, г), принят за основной. Унифицированный сигнал с выхода про-

межуточного преобразователя 4б, измеряющего расход основного потока, поступает в регулятор соотношения 3б, который воздействует на регулирующий клапан 3в на линии второго потока  $Q_2$ . Тем самым обеспечивается поддержание заданного соотношения расходов  $Q_1$  и  $Q_2$ . При использовании измерительных преобразователей различных типов, например диафрагмы 4а и ротаметра 3а, имеющих различные статические характеристики, применяют дополнительные функциональные блоки для согласования их характеристик, что позволяет уменьшить погрешность регулирования.

Поскольку характеристика ротаметра линейная, а диафрагмы — квадратичная, то в схеме применен функциональный блок 4д, выполняющий операцию извлечения корня из значения выходного сигнала дифманометра 4б. С выхода этого блока сигнал поступает на регулятор 3б в качестве задания, а регулируемым параметром является выходной сигнал ротаметра 3а, измеряющего расход  $Q_2$ .

При изменении задания регулятор 4в АСР основного потока изменит его расход  $Q_1$ . Это приведет к изменению выходного сигнала преобразователя 4б, а следовательно, и задания регулятору 3б в АСР соотношения потоков. Расход потока  $Q_2$  при этом изменится так, чтобы сохранилось заданное соотношение расходов  $Q_1$  и  $Q_2$ .

**Уровень.** Системы регулирования уровня могут быть разделены на две категории: системы, в которых уровень представляет собой основной параметр технологического процесса, и системы, где уровень является вспомогательным параметром. В первом случае назначение системы регулирования состоит в том, чтобы поддерживать заданное значение уровня постоянным независимо от изменений нагрузки. Во втором случае точного поддержания уровня не требуется. Например, уровень в выпарном аппарате или абсорбере является одним из основных параметров, определяющих режим объекта, и АСР должна обеспечивать высокую точность регулирования уровня.

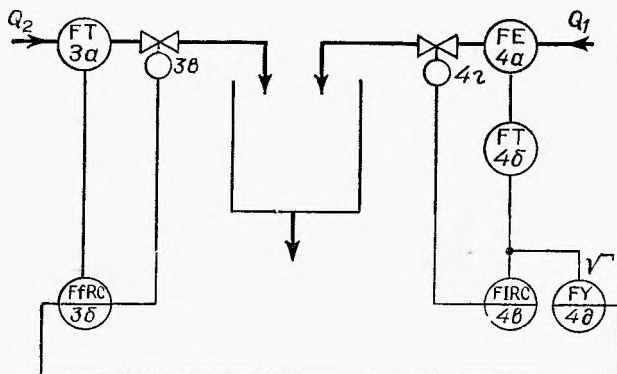


Рис. 147. Функциональная схема АСР соотношения двух потоков.

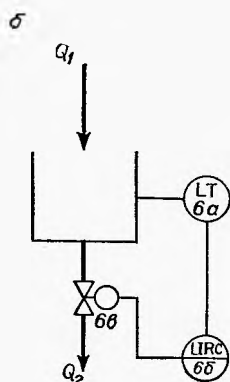
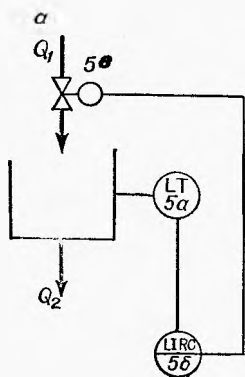


Рис. 148. Функциональная схема АСР уровня:

а — изменением притока;  
б — изменением потребления.

К числу объектов, в которых уровень является вспомогательным параметром, относятся буферные емкости, хранилища и т. п. Здесь основная задача АСР — следить, чтобы резервуар не переполнялся или не опустел.

В большинстве случаев уровень регулируется изменением расхода жидкости на входе в аппарат или на выходе из него с помощью дроссельных регулирующих органов. Выбор способа регулирования зависит от назначения технологического аппарата. Если, например, необходимо обеспечить заданный расход жидкости  $Q_2$  на выходе из аппарата, то уровень в нем регулируется изменением расхода  $Q_1$  на притоке (рис. 148, а). Если аппарат должен принять весь расход жидкости  $Q_1$ , то уровень регулируется изменением расхода  $Q_2$  выходного потока (рис. 148, б).

Для регулирования уровня в буферных емкостях часто применяют позиционные АСР, обеспечивающие поддержание уровня в заданных пределах. Схема регулирования уровня, изображенная на рис. 149, управляет подачей жидкости таким образом, что клапан на притоке включается при снижении уровня до отметки «мин» и выключается при повышении уровня до отметки «макс». Любое значение уровня между этими отметками считается нормальным.

**Температура.** Необходимость в автоматическом регулировании температуры возникает во многих технологических процессах. Так, температура является одним из основных показателей широко распространенных в химической технологии теплообменных процессов. В различных по назначению аппаратах температуру регулируют изменением подвода или отвода тепла. Стабилизация заданной температуры может быть достигнута различными методами. Большинство из них сводится к изменению расхода теплоносителя, причем температура может измеряться не-

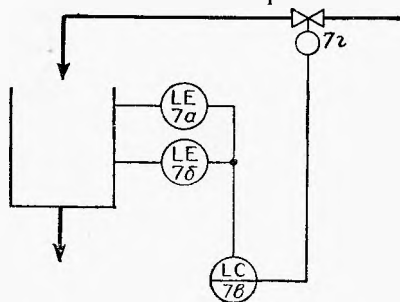


Рис. 149. Функциональная схема двухпозиционной АСР уровня.

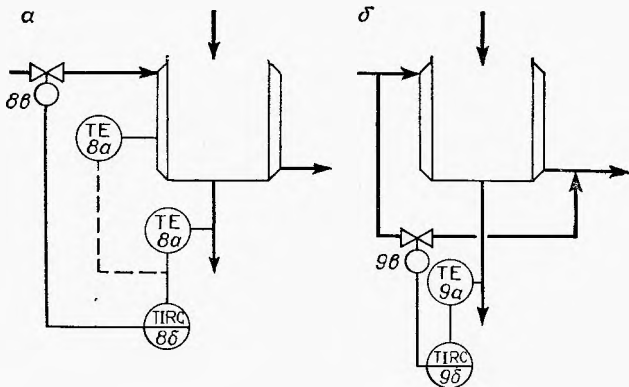


Рис. 150. Функциональные схемы АСР температуры:

*а* — изменением подачи теплоносителя; *б* — байпасированием потока теплоносителя.

посредственно в аппарате или в выходном трубопроводе (рис. 150, *а*).

В тех случаях, когда изменение расхода теплоносителя недопустимо, для регулирования температуры применяют отвод (байпасирование) части потока теплоносителя (рис. 150, *б*). В таких схемах регулирующее воздействие перераспределяет поток теплоносителя между основной и байпасной линиями, сохраняя неизменной величину общего расхода теплоносителя.

В некоторых процессах химической технологии при нарушении технологического регламента может возникнуть аварийный режим. В таких потенциально опасных процессах температура часто служит показателем выхода в аварийный режим.

**Качество продуктов.** Получение продуктов заданного качества является основной задачей любого химико-технологического процесса. Поэтому АСР, стабилизирующая непосредственно качество целевого продукта, является наилучшим решением при автоматизации большинства объектов химической технологии: реакторов, ректификационных колонн, абсорбторов и т. д.

В качестве примера на рис. 151 приведена схема управления процессом непрерывной нейтрализации сточных вод кислотой. Здесь имеются АСР уровня в нейтрализаторе (11а—11в) и рН на выходе из него (10а—10в).

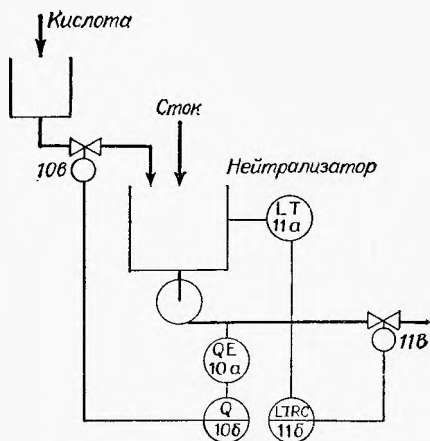


Рис. 151. Функциональная схема АСР непрерывной нейтрализации сточных вод кислотой.

Однако во многих случаях из-за отсутствия необходимых приборов качеством целевого продукта управляют косвенно, по таким параметрам, как давление, температура, расход и т. п.

### § 37. СИГНАЛИЗАЦИЯ, ЗАЩИТА И БЛОКИРОВКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

**Сигнализация.** Устройства сигнализации предназначены для извещения обслуживающего персонала о состоянии контролируемых объектов. Сигнализация может быть световая и звуковая. Световая сигнализация подается с помощью сигнальных ламп с различным режимом свечения (ровный или мигающий свет, полный или неполный накал) или световыми указателями различного цвета. Звуковая сигнализация подается звонками, сиренами или гудками. Часто применяют сочетание световой и звуковой сигнализации. В таких случаях звуковой сигнал служит для извещения оператора о возникновении аварийного режима, а световой — указывает на место возникновения и характер этого режима.

Различают также технологическую и контрольную сигнализацию.

Технологическая сигнализация извещает о нарушении нормального хода технологического процесса, что обычно проявляется в отклонении от заданного значения технологических параметров: температуры, давления, уровня, расхода, концентрации и т. п. На производствах, где возможно появление в помещениях паров пожаро- и взрывоопасных веществ, а также токсичных продуктов, сигнализируется превышение предельно допустимых концентраций таких веществ.

Технологическая сигнализация бывает двух видов: предупредительная и аварийная.

Предупредительная сигнализация извещает о больших, но еще допустимых отклонениях параметров процесса от заданных. При появлении сигналов предупредительной сигнализации оператор должен принять меры для устранения возникающих неисправностей.

Аварийная сигнализация извещает о недопустимых отклонениях параметров процесса от регламентных или о внезапном отключении какого-либо технологического аппарата. Аварийная сигнализация требует немедленных действий оператора по заранее составленной инструкции. Поэтому такая сигнализация подается мигающим светом и резким звуком.

Схемы аварийной сигнализации обычно снабжают кнопкой отключения (съема) звукового сигнала. При поступлении нового аварийного сигнала звуковая сигнализация включается снова. Иногда применяют схемы без повторения звукового сигнала. Такие схемы более просты; они используются в тех случаях, когда появление хотя бы одного из аварийных сигналов автоматически вызывает остановку всего процесса.

На рис. 152 приведена схема электрической сигнализации двух технологических параметров.

При отклонении от нормы одного из них, например первого, замыкается технологический контакт S1, расположенный в соответствующем измерительном приборе или сигнализаторе. При этом включается реле 1К, которое своим замыкающим контактом 1К1 включает сигнальную лампу HL1 и отключает ее от кнопки опробования сигнализации SB3. Одновременно замыкающий контакт 1К2 реле 1К через размыкающий контакт 3К2 выключенного реле 3К включает звонок HA. Выключается звонок кнопкой съема звуковой сигнализации SB1, при нажатии которой реле 3К через свой замыкающий контакт 3К1 становится на самоблокировку, а размыкающим контактом отключает звонок.

Если при таком состоянии схемы замкнется второй технологический контакт S2, то при снятом звуковом сигнале загорится лишь сигнальная лампа HL2, а звуковой сигнал не будет подан. В исходное состояние схема придет после размыкания обоих технологических контактов S1 и S2, что вызовет отключение всех реле.

Кнопки SB2 и SB3 предназначены для опробования звонка и сигнальных ламп.

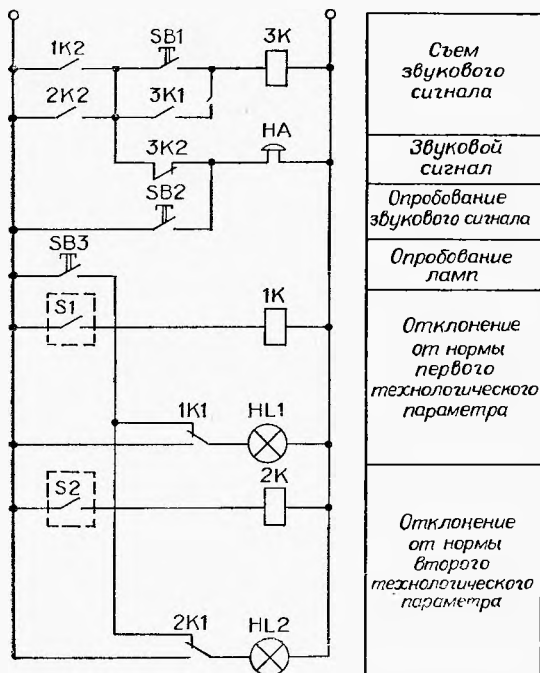


Рис. 152. Схема сигнализации.

Контрольная сигнализация извещает о состоянии контролируемых объектов: открыты или закрыты регулирующие органы, включены или отключены насосы, мешалки, воздуходувки и т. п. Наиболее просто контрольная сигнализация выполняется для устройств, имеющих только два рабочих положения: открыто — закрыто или включено — отключено.

Следует иметь в виду, что контрольная сигнализация иногда может выдать неверную информацию. Например, если для сигнализации о работе насоса используют блок-контакты магнитного пускателя, то такая схема будет информировать о включенном насосе даже в том случае, когда он неисправен или закрыт запорный клапан на нагнетании. Поэтому в таких случаях необходимо обращать внимание на показания приборов, подтверждающих достоверность полученной информации. Таким прибором может быть, например, расходомер на линии нагнетания или манометр, установленный за запорным органом.

**Автоматическая защита.** Устройства автоматической защиты предназначены для предотвращения аварий на производствах, где изменение условий протекания технологических процессов может привести к возникновению аварийной ситуации. К числу таких потенциально опасных относятся процессы с высокими скоростями реакций, протекающие в условиях интенсивного тепловыделения, при больших давлениях и температурах и т. п.

Устройства автоматической защиты в подобных процессах должны реагировать на нарушение нормального режима таким образом, чтобы предаварийное состояние не перешло в аварийное. Для этого обычно проводят защитные мероприятия: снижение давления или температуры реакционной массы, включение резервных насосов, отключение подачи топлива, продувку инертным газом и т. д.

Некоторые защитные мероприятия, особенно в процессах, где авария может привести к тяжелым последствиям, предусматривают полную остановку технологического процесса, например посредством сброса реакционной массы из аппарата. Поскольку последующие пуск и наладка производственного процесса — задача сложная, то необходимо исключить ложное срабатывание устройств автоматической защиты. Это достигается, например, установкой двух отдельных устройств защиты, реагирующих на один и тот же признак опасности. Устройства защиты соединены так, чтобы исполнительный механизм защитного устройства включался только при их одновременном срабатывании.

В качестве примера рассмотрим автоматическую систему защиты процесса нитрования (рис. 153). Процесс происходит в реакторе с рубашкой 4, снабженном мешалкой 3 и системой вытяжки. Исполнительными механизмами системы защиты являются: отсекающие клапаны 2 на линиях подачи нитрующего и нитруемого компонентов, клапан аварийного сброса 1 и отсекающий клапан 5 для подключения к аварийной вытяжке.

Защита процесса происходит в несколько этапов. При повышении температуры в реакторе двигатель мешалки 3 включается на повышенное число оборотов для более интенсивной отдачи тепла охлаждающей рубашке. При уменьшении разрежения в реакторе при аварийном газовыделении открывается отсечной клапан 5, соединяющий газовую полость реактора с аварийной вытяжкой. Если в газовой фазе появляются опасные компоненты, закрываются отсечные клапаны 2 и прекращается подача исходных компонентов. И наконец, если появились опасные компоненты в жидкой фазе, открывается клапан аварийного сброса 1 и одновременно изменяется направление вращения мешалки 3, что способствует быстрому сбросу реакционной массы из реактора.

Примером повсеместно применяемой системы автоматической защиты может служить схема управления электродвигателем (рис. 154). Схема работает следующим образом. При включении пусковой кнопки SB1 замыкается цепь питания обмотки магнитного пускателя КМ. Своими силовыми контактами КМ2 магнитный пускатель включает электродвигатель, а блок-контактом КМ1 шунтирует пусковую кнопку. После этого кнопку можно отпустить, а цепь питания обмотки магнитного пускателя останется замкнутой через его блок-контакт КМ1.

Отключают двигатель нажатием кнопки «Стоп» SB2. При этом разрывается цепь питания обмотки пускателя и размыкаются его контакты КМ1 и КМ2. После отпускания кнопки SB2 обмотка магнитного пускателя остается обесточенной.

В этой схеме предусмотрено действие защиты в трех возможных аварийных ситуациях: при исчезновении напряжения в сети, при перегрузках и при коротких замыканиях.

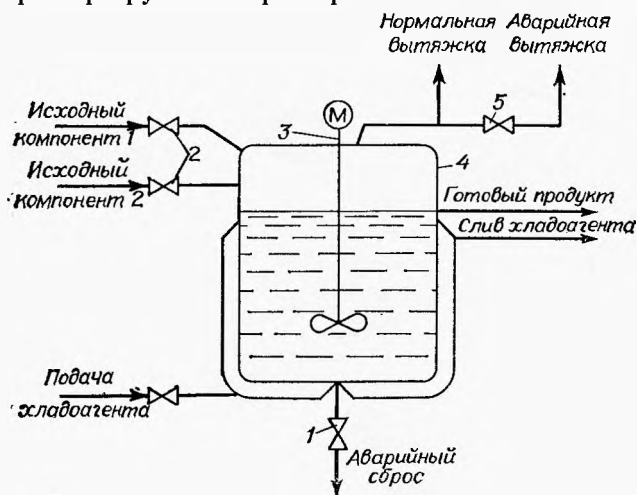


Рис. 153. Автоматическая система защиты процесса нитрования:

1 — клапан аварийного сброса; 2, 5 — отсечные клапаны; 3 — мешалка; 4 — реактор с рубашкой.



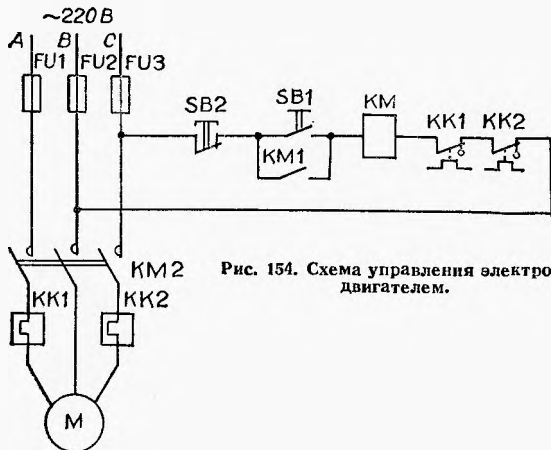


Рис. 154. Схема управления электродвигателем.

При исчезновении напряжения в сети, например при отключении подачи электроэнергии, происходит отключение магнитного пускателя и остановка электродвигателя. Блок-контакт КМ1 обеспечивает защиту электродвигателя от самопроизвольного повторного включения при возобновлении подачи электроэнергии. Повторный пуск электродвигателя возможен только после нажатия пусковой кнопки SB1.

Защита электродвигателя от перегрузок осуществляется тепловыми реле КК1 и КК2, нагревательные элементы которых включены в две фазы питания электродвигателя, а размыкающие контакты — в цепь питания обмотки магнитного пускателя. Для нового запуска электродвигателя, отключенного тепловым реле, необходимо сначала вручную нажать кнопку, замыкающую контакты теплового реле.

Защита электродвигателя и цепи магнитного пускателя от коротких замыканий выполняется предохранителями FU1, FU2 и FU3.

**Блокировка.** Служит для предотвращения неправильной последовательности включений и выключений механизмов, машин и аппаратов.

На рис. 155 приведена схема управления реверсивным электродвигателем. Эта схема исключает возможность одновременного срабатывания магнитных пускателей «вперед» 1КМ и «назад» 2КМ, так как при этом через силовые контакты обоих пускателей происходит короткое замыкание двух фаз питания. Такая блокировка обеспечивается введением нормально замкнутых блок-контактов 2КМ3 и 1КМ3 в цепи обмоток магнитных пускателей 1КМ и 2КМ.

При замыкании кнопкой SB1 цепи питания магнитного пускателя 1КМ его нормально замкнутый блок-контакт 1КМ3 в цепи питания магнитного пускателя 2КМ размыкается. Это делает невозможным включение магнитного пускателя 2КМ без

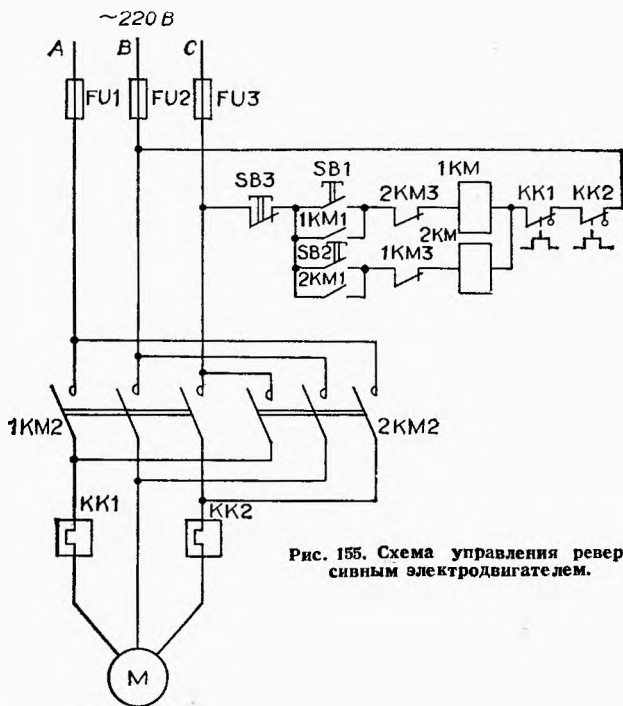


Рис. 155. Схема управления реверсивным электродвигателем.

предварительного выключения магнитного пускателя 1KM кнопкой SB3. Аналогично при включении магнитного пускателя 2KM кнопкой SB2 невозможно одновременное включение магнитного пускателя 1KM. Включение питания на обмотки двигателя осуществляется силовыми контактами 1KM2 или 2KM2.

### Контрольные вопросы

1. Чем отличается технологическая сигнализация от контрольной?
2. Чем отличается предупредительная сигнализация от аварийной?
3. Для чего производят поэтапную защиту опасного технологического процесса?
4. Почему электродвигателями в технологическом процессе управляют с помощью магнитных (и других) пускателей?
5. Какие системы защиты предусмотрены при управлении реверсивным электродвигателем?

### § 38. НАЗНАЧЕНИЕ И ФУНКЦИИ АСУТП

В современных технологических процессах совершается много различных операций с сырьем, полупродуктами и энергоносителями на пути превращения их в готовый продукт. Поэтому весь технологический процесс можно разбить на ряд элементарных процессов, таких, как нагревание, упаривание, ректификация, адсорбция, окисление, восстановление и др. Протекание каждого элементарного процесса характеризуется технологиче-

скими показателями, такими, как расход, давление, уровень, концентрация, температура и т. п. Совокупность технологических показателей всех элементарных процессов, составляющих данный технологический процесс, определяет его технологический режим.

Эффективность любого технологического процесса определяется качеством и себестоимостью готовой продукции и зависит от технологического режима производства. Может показаться, что для достижения максимальной эффективности технологического процесса достаточно заранее определить оптимальный технологический режим и поддерживать его путем стабилизации основных технологических показателей с помощью соответствующих АСР. В таком случае система управления всем технологическим процессом будет состоять из множества локальных АСР, относящихся к элементарным процессам и не связанных между собой. Однако такое решение задачи автоматизации приемлемо только для несложных технологических процессов. Для современных химических предприятий со сложной технологией такой подход к автоматизации производства не приводит к успеху.

Проиллюстрируем это на примере автоматизации процесса получения обжигового газа в производстве серной кислоты. Обжиговый газ получают путем обжига колчедана в печах с псевдооживленным слоем. Процесс ведут в двух параллельных технологических нитках, работающих на общий коллектор обжигового газа. Использование двух ниток обеспечивает бесперебойность технологического процесса: при уменьшении по каким-либо причинам производительности одной из ниток требуемую суммарную производительность выдерживают увеличением производительности другой нитки. Упрощенная схема обжигового комплекса представлена на рис. 156.

Основной задачей управления процессом является поддержание требуемой суммарной производительности по обжиговому газу ( $F_3$ ) и постоянной концентрации в нем сернистого ангидрида. Концентрацию сернистого ангидрида можно стабилизировать в каждой нитке в отдельности ( $Q_1$  и  $Q_2$ ) изменением расхода колчедана ( $M_1$  и  $M_2$ ), а расход обжигового газа в каждой нитке ( $F_1$  и  $F_2$ ) — воздействием на расход воздуха ( $K_1$  и  $K_2$ ). Эти задачи могут решать локальные стабилизирующие АСР. В нормальном режиме заданный расход газа в нитках устанавливается одинаковым и равным половине требуемого суммарного расхода.

В процессе работы в одной из ниток может возникнуть нарушение нормального технологического режима, приводящее к снижению его производительности. Например, может забиться питатель на одной нитке и расхода колчедана будет не хватать для поддержания требуемой концентрации сернистого ангидрида. В этом случае система управления процессом, состоящая из локальных АСР, не сможет поддерживать требуемый техно-

логический режим и, следовательно, будет неработоспособна. Поэтому для управления технологическим процессом получения обжигового газа применяют АСУТП.

На случай нехватки колчедана для поддержания заданной концентрации сернистого ангидрида в АСУТП предусмотрен переход на стабилизацию концентрации изменением расхода воздуха, т. е. переключение на другое управляющее воздействие ( $K1$  или  $K2$ ). Ясно, что при этом требуемый суммарный расход обжигового газа уже не удастся обеспечить, и для его поддержания необходимо увеличить производительность второй нитки на соответствующую величину. Для этого предусмотрен переход на другой регулируемый параметр — суммарный расход газа после общего коллектора ( $F3$ ) вместо расхода газа в нитке ( $F1$  или  $F2$ ).

Из сказанного можно сделать вывод, что при управлении крупным технологическим комплексом возникают задачи, которые принципиально не сводятся к стабилизации отдельных технологических параметров. Типичная из них — распределение суммарной производительности между параллельно работающими агрегатами, пример которой был рассмотрен.

Другая важная задача АСУТП — согласование производительности (нагрузки) последовательных технологических участков. Каждый участок непрерывного производства имеет ограниченную пропускную способность (предельную производительность) по перерабатываемому продукту, причем пропускная

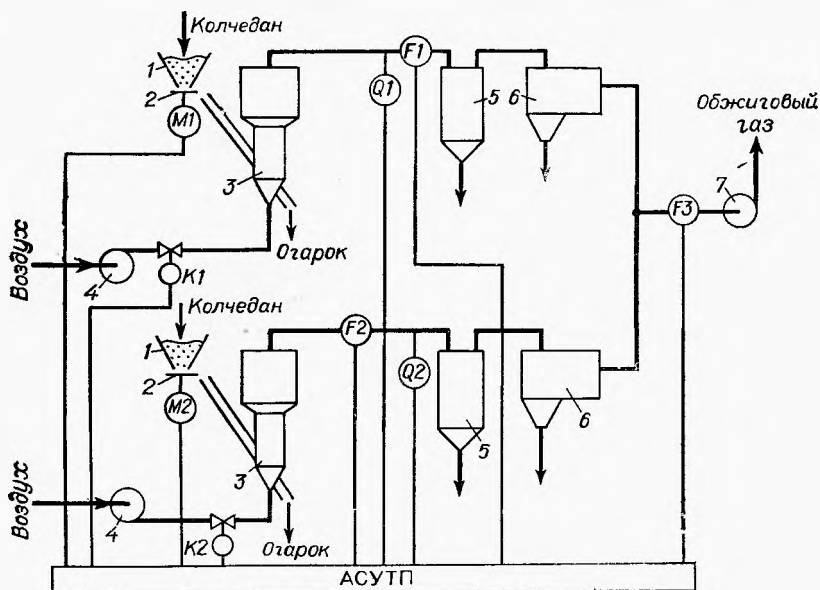


Рис. 156. Функциональная схема АСУТП обжигового комплекса:

1 — бункер колчедана; 2 — питатель; 3 — печи с псевдоожиженным слоем; 4 — воздуходувка; 5 — циклон; 6 — электрофильтр; 7 — вентилятор.

способность может изменяться во времени вследствие различных факторов: изменения свойств сырья и полупродуктов, нехватки энергетических ресурсов, износа части технологического оборудования и отключения его на ремонт и т. п. Поэтому на производстве могут возникать ситуации, когда какой-либо участок технологической цепи лимитирует производительность всего технологического комплекса.

Чтобы не снижать производительность комплекса в подобных случаях, между соседними технологическими участками создают запасы промежуточных продуктов в специальных буферных емкостях. Маневрирование этими запасами позволяет в течение некоторого времени согласовывать работу участков с пониженной производительностью с работой смежных участков. Управление запасами в буферных емкостях с целью поддержания заданной производительности технологического комплекса — специфическая задача, которая не сводится к стабилизации уровней материала в буферных емкостях. Так, в производстве серной кислоты между соседними технологическими участками подготовки серного колчедана и получения обжигового газа роль буферных емкостей играют бункеры колчедана I (см. рис. 156). Благодаря этому на участке получения обжигового газа можно поддерживать требуемый расход колчедана и, следовательно, требуемую концентрацию при кратковременных сбоях на предшествующем участке подготовки колчедана за счет расходования запасенного в бункерах колчедана. И наоборот, при временных снижениях производительности по обжиговому газу можно поддерживать неизменной выработку колчедана на предшествующем участке за счет накопления запаса колчедана в бункерах. Понятно, что для решения такой задачи нельзя применить обычную АСР уровня колчедана в бункерах.

Еще одна особенность промышленных процессов заключается в том, что не все технологические показатели, которыми необходимо управлять, доступны для непосредственного и непрерывного измерения. Как отмечалось в § 34, особенно трудно поддаются измерениям показатели состава и качества перерабатываемых веществ (концентрации компонентов растворов, фракционный состав смесей и др.). Поэтому некоторые технологические показатели определяют по результатам измерений других, связанных с ними показателей (косвенные измерения), или организуют лабораторный анализ периодически отбираемых проб продуктов (дискретные измерения). В этих случаях требуется специальная предварительная обработка результатов измерений для оценивания по ним технологических показателей, которые не поддаются измерению или измеряются неточно и редко.

Чем сложнее технологический процесс, тем больше в нем может возникать разных ситуаций, требующих вмешательства человека. Это, например, ситуации, связанные с пуском и оста-

новкой технологических аппаратов, переключениями в технологической схеме, нехваткой каких-либо материальных или энергетических ресурсов для нормального ведения процесса и др. Поэтому любая современная АСУТП предполагает участие человека-оператора в процессе управления.

Человек как звено системы управления обладает специфическими особенностями. С одной стороны, он способен принимать решения в условиях неопределенности, качественно оценивать ситуацию, взвешивая различные факторы, находить оптимальные и компромиссные решения. Например, при неисправности в одной из ниток участка получения обжигового газа оператор АСУТП должен решить, можно ли оставить неизменной производительность участка за счет увеличения нагрузки другой нитки или следует снизить суммарную производительность. При этом он принимает во внимание состояние технологических аппаратов, запасы колчедана в бункерах, отставание или опережение плана выпуска продукции и другие факторы. Такие действия оператора невозможно автоматизировать и запрограммировать в АСУТП.

С другой стороны, человеческие способности к быстрому счету и количественному учету множества измеряемых технологических показателей ограничены. Оператор не может учитывать весь обширный поток измерительной информации, имеющейся в АСУТП, для принятия решения. Поэтому для повышения эффективности действий оператора АСУТП очень важен способ представления и характер информации. Представляемая информация должна наглядно отражать как текущее состояние технологического процесса, так и тенденцию его изменения. Объем информации должен быть ограничен за счет отбора наиболее важных технологических показателей и предварительной их обработки с целью отсеивания случайных колебаний, не отражающих характер протекания технологического процесса.

Предварительная обработка и представление оператору АСУТП сводной информации о ходе технологического процесса — отдельная задача АСУТП.

Итак, автоматизированная система управления сложным технологическим комплексом выполняет много различных операций по управлению процессом, связанных с получением и передачей результатов измерений технологических показателей, выработкой управляющих воздействий, передачей и реализацией этих воздействий на объекты управления, а также операций, обеспечивающих взаимодействие оператора с системой управления. Группы таких операций, объединенные общей целью, называют функциями АСУТП. Все функции системы можно разделить на две группы: информационные и управляющие.

Информационные функции АСУТП включают:  
измерение технологических показателей;

передачу результатов измерений в управляющий вычислительный комплекс (УВК) с преобразованием сигналов в цифровую форму;

подготовку и представление информации оператору АСУТП.

К информационным функциям обычно относят и специальную обработку результатов измерений с целью получения непосредственно не измеряемых технологических параметров.

Способы измерения технологических параметров и дистанционной передачи результатов измерений были рассмотрены в главах IV и V.

Так как все вычисления и логические действия в УВМ производятся в численном виде, то вводимые в нее измерительные сигналы необходимо преобразовать в цифровую форму. Это производится аналого-цифровыми преобразователями (АЦП). Если измерительный сигнал изменяется скачком, дискретно (например, насос может быть только включен или только выключен), то надобность в АЦП отпадает.

Подготовка информации для оператора АСУТП заключается в обработке текущей измерительной информации и управляющих воздействий по специальным алгоритмам с целью наглядного представления хода технологического процесса и результатов управления им. Например, вычисляются усредненные значения основных режимных параметров; средние за смену, сутки, месяц удельные расходы сырья и энергии; фиксируются отклонения и нарушения технологического режима. Подготовленная для наглядного представления информация должна быть выведена из УВМ на специальное устройство отображения информации. Такими устройствами являются видеотерминалы, в которых информация отображается в цифровой, текстовой или графической форме на экране дисплея, и печатающие устройства, выдающие информацию на рулоне бумаги. В свою очередь, оператор при необходимости вмешивается в работу системы управления с помощью специальных команд, которые он вводит в УВМ с клавиатуры пульта управления.

Управляющие функции АСУТП включают:

расчет управляющих воздействий по заданным алгоритмам; преобразование управляющих воздействий из цифровой формы в управляющие сигналы;

передачу управляющих сигналов на исполнительные механизмы.

Расчет управляющих воздействий проводится по заранее разработанным и запрограммированным алгоритмам. Типичные примеры таких алгоритмов — рассмотренные в § 25 стандартные законы регулирования: П-, ПИ- и ПИД. Последовательность вычислений управляющего воздействия по таким законам и составляет алгоритм управления.

Рассмотрим в качестве примера алгоритм реализации ПИ-закона регулирования. В соответствии с его определением выходной сигнал регулятора  $z$  рассчитывается в зависимости от

отклонения  $\Delta x$  регулируемого параметра  $x$  от его заданного значения  $x_{\text{зад}}$  по формулам:

$$\left. \begin{aligned} z &= z_0 + k \Delta x \\ z'_0 &= \frac{k}{T_n} \Delta x \end{aligned} \right\} \quad (77)$$

Здесь  $k$ ,  $T_n$  — постоянные величины (настроечные параметры),  $z'_0$  — скорость изменения интегральной составляющей, по которой определяется сама величина  $z_0$ .

Вычисления по алгоритму проводятся в УВМ, в отличие от обычного регулятора, не непрерывно, а дискретно, через определенные промежутки времени  $\Delta t$ . На каждом такте вычислений необходимо производить следующие действия.

1. Получить очередное значение регулируемого параметра  $x$  от датчика (эта операция называется опросом датчика).
2. Вычислить рассогласование — отклонение  $\Delta x$ :

$$\Delta x = x - x_{\text{зад}} \quad (78)$$

(значение  $x_{\text{зад}}$  хранится в памяти УВМ).

3. Определить очередное значение интегральной составляющей  $z_0$  по скорости её изменения  $z'_0$ . Как известно из курса физики, скорость изменения величины  $z_0$  за время одного такта вычислений  $\Delta t$  равна  $(z_0 - z_{0 \text{ пред}})/\Delta t$ , где  $z_{0 \text{ пред}}$  — значение  $z_0$ , определенное на предыдущем такте вычислений. Подставляя это выражение вместо  $z'_0$  в формулы (77), получим:

$$\frac{z_0 - z_{0 \text{ пред}}}{\Delta t} = \frac{k}{T_n} \Delta x.$$

Отсюда можно найти очередное значение  $z_0$  через его предыдущее значение  $z_{0 \text{ пред}}$ :

$$z_0 = z_{0 \text{ пред}} + \frac{k \Delta t}{T_n} \Delta x. \quad (79)$$

(Формулы такого типа, по которым каждое новое значение какого-либо параметра находят через его значение, вычисленное на предыдущем такте по этой же формуле, называются рекуррентными).

Значение интегральной составляющей в цифровых алгоритмах управления обычно ограничивают заранее заданными минимальным  $z_{0 \text{ min}}$  и максимальным  $z_{0 \text{ max}}$  значениями. Это вызвано тем, что при длительном рассогласовании в контуре регулирования интегральная составляющая может достигать недопустимо большого положительного или отрицательного значения. Например, если в АСР температуры смеси в реакторе (см. рис. 7) подача пара в реактор почему-либо прекратилась, то температура смеси станет меньше заданной, интегральная составляющая  $z_0$  расчетного расхода пара в соответствии с формулой (79) будет неограниченно увеличиваться и может во много раз превысить максимально возможный расход пара через регулирующийся клапан.



Для двухстороннего ограничения величины  $z_0$  выполняют следующие операции:

4. Если  $z_0 < z_{0 \min}$ , то в качестве  $z_0$  принять значение  $z_{0 \min}$ . Если  $z_0 > z_{0 \max}$ , то в качестве  $z_0$  принять  $z_{0 \max}$ . В противном случае, когда  $z_{0 \min} < z_0 < z_{0 \max}$ , вычисленное значение  $z_0$  оставить без изменений.

5. Вычислить значение  $z$  [см. систему уравнений (77)]:

$$z = z_0 + k \Delta x.$$

6. Выдать найденное значение  $z$  на исполнительный механизм.

Описанная последовательность действий повторяется через промежуток времени  $\Delta t$ .

Последовательность действий по алгоритмам обычно изображают в виде блок-схемы. Блок-схема описанного алгоритма стабилизации температуры в реакторе приведена на рис. 157.

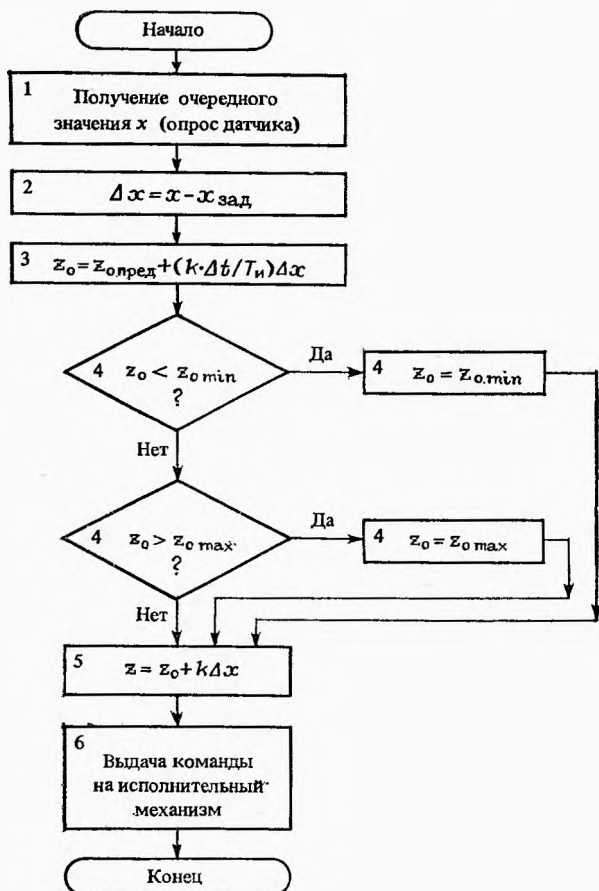


Рис. 157. Блок-схема алгоритма реализации ПИ-закона регулирования в УВМ.

В АСУТП применяют и более сложные алгоритмы — алгоритмы многосвязного управления по нескольким измеряемым показателям, алгоритмы согласования производительности последовательных технологических участков и распределения нагрузок между параллельно работающими агрегатами, алгоритмы оптимизации технологического режима и диагностики нарушений технологического регламента и др. Так, сложный алгоритм используется в описанном выше способе управления суммарной производительностью процесса получения обжигового газа.

Для реализации рассчитанных управляющих воздействий их необходимо преобразовать из цифровой формы в аналоговые управляющие сигналы. Эту функцию выполняют цифроаналоговые преобразователи (ЦАП). Если управляющий сигнал не аналоговый, а дискретный, например, для управления типа «открыто — закрыто», то надобность в ЦАП отпадает. Далее управляющие сигналы передают на исполнительные механизмы по каналам связи УВМ с объектами управления.

Иногда рассчитанные в АСУТП управляющие воздействия передают не непосредственно на исполнительные механизмы, а на локальные следящие АСР в виде заданий. Например, рассчитываемый в АСУТП (см. рис. 156) расход воздуха можно обеспечить двумя путями: командой, передаваемой из УВМ непосредственно исполнительному механизму клапана (К1 или К2), или командой в виде задания локальной АСР расхода воздуха, которая уже сама будет управлять клапаном. Такой способ реализации управляющих воздействий в АСУТП называется *супервизорным* управлением, а способ непосредственного воздействия УВМ на исполнительные механизмы — *непосредственным цифровым управлением* (НЦУ). Достоинством супервизорного управления является более высокая надежность АСУТП: при сбоях в УВМ продолжается стабилизация технологических па-

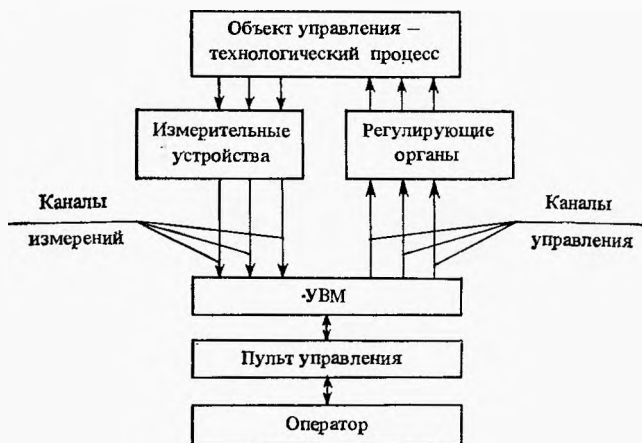


Рис. 158. Упрощенная структурная схема АСУТП.

раметров аналоговыми АСР; недостатком — усложнение системы техническими средствами АСР.

В соответствии с описанными функциями АСУТП ее можно упрощенно представить в виде структурной схемы, приведенной на рис. 158. Как видно из схемы, АСУТП подобна рассматривавшимся ранее замкнутым АСР, но состоит не из одного, а из множества контуров с общим управляющим устройством, роль которого играет УВМ. Кроме того, важным отличием АСУТП от АСР является присутствие в ней человека-оператора, который взаимодействует с системой через пульт управления.

Приведенная схема весьма упрощена: на ней не показаны измерительные устройства, исполнительные механизмы, средства представления информации и возможные дополнительные пулты управления.

### Контрольные вопросы

1. Почему АСУТП не может состоять из одних локальных АСР?
2. Как в АСУТП процесса получения обжигового газа обеспечивается требуемая производительность по газу?
3. Какую, по Вашему мнению, сводную информацию следует представлять оператору АСУТП получения обжигового газа?
4. В чем заключаются информационные функции АСУТП? управляющие функции?
5. Что необходимо изменить в алгоритме ПИ-закона регулирования (рис.157), чтобы получить П-закон?
6. Можно ли в АСУТП получения обжигового газа применить супервизорное управление? НЦУ?

### § 39. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АСУТП

АСУТП представляет собой комплекс технических средств, состоящий из большого числа различных блоков, модулей и устройств. Часть этих устройств — датчики, измерительные преобразователи, исполнительные механизмы и регулирующие органы — уже рассматривались как составные части АСР. Характерной технической особенностью АСУТП является наличие в ее составе средств вычислительной техники. Весь набор устройств вычислительной техники, реализующий алгоритмы АСУТП, называется управляющим вычислительным комплексом (УВК). Главной частью УВК является цифровая управляющая вычислительная машина (УВМ). УВМ выполняет все расчеты, связанные с обработкой поступающей в нее информации от измерительных устройств и операторов технологических установок. УВМ, в отличие от обычных вычислительных машин, работают в реальном масштабе времени. Это означает, что расчеты ведутся по мере поступления информации, а результаты расчетов сразу же преобразуются в управляющие воздействия. Численная обработка информации, вводимой в УВМ, производится по заранее составленным программам, которые задают порядок вычислений.

Вычисления производятся специальным устройством — процессором, который организует весь вычислительный процесс. В соответствии с командами, закодированными в программах, он в нужные моменты времени считывает из памяти УВМ хранящиеся в ней числа, производит над ними арифметические и логические операции, записывает в память результаты вычислений, управляет устройствами связи УВМ с объектами и устройствами ввода — вывода информации от оператора. В современных УВМ все действия процессора выполняются с очень большой скоростью — миллионы арифметических операций в секунду. Столь высокое быстродействие необходимо для того, чтобы за короткие интервалы времени между очередными тактами управления успеть обработать в соответствии с заданной программой всю текущую информацию с объекта управления.

Процессор УВМ представляет собой одну или несколько больших интегральных микросхем, включающих тысячи и десятки тысяч транзисторов и других радиодеталей. Размеры же таких микросхем не превышают нескольких сантиметров.

Другим важным устройством в УВМ является запоминающее устройство, или просто память. Память необходима для того, чтобы сохранять текущую информацию в АСУТП на все время, в течение которого она может потребоваться для вычислений или для представления оператору. В больших системах управления объем информации измеряется сотнями тысяч и миллионами чисел, и поэтому память УВМ в техническом отношении представляет собой большое количество элементарных ячеек, каждая из которых способна хранить одно число. Запись чисел в ячейки памяти и их считывание производится по командам процессора с очень большой скоростью — за миллионные доли секунды (микросекунды).

Применяют различные устройства памяти: на полупроводниках в виде интегральных микросхем, на магнитных носителях в виде магнитофонных лент или магнитных дисков и др. Полупроводниковая память обладает большим быстродействием (большие скорости записи и чтения информации) и большой емкостью (десятки и сотни тысяч ячеек в одной микросхеме). Однако даже такой емкости памяти часто оказывается недостаточно. Кроме того, информация, записанная в таком устройстве, может быть утеряна при нарушении электропитания. Магнитные ленты или диски обладают гораздо большей емкостью памяти (до десятков миллионов ячеек), однако запись и чтение информации на них занимает значительное время, которое затрачивается на механическое перемещение ленты или магнитной головки. Поэтому полупроводниковая память обычно используется в УВМ для информации, которая должна часто и быстро изменяться в ходе вычислений по алгоритмам АСУТП, а магнитная — для долговременного хранения больших массивов информации.

Кроме процессора и памяти УВМ включает различные устройства, обеспечивающие передачу закодированных сигналов в виде электрических импульсов между отдельными узлами УВМ.

Для работы в АСУТП УВМ должна получать численную информацию, выдавать ее оператору, воспринимать команды операторов и программистов. С этой целью в состав УВК входят устройства связи УВМ с объектами (УСО) и устройства ввода — вывода информации, называемые терминальными устройствами или просто терминалами. Главной частью УСО являются преобразователи непрерывных (аналоговых) электрических сигналов в цифровую форму и обратно — соответственно АЦП и ЦАП, о которых упоминалось в § 38. Эти устройства работают дискретно во времени: на каждом очередном такте преобразования в зависимости от текущего значения измеряемого сигнала вырабатывается определенный набор электрических импульсов (числовой код сигнала) или наоборот, по данному числовому коду вырабатывается аналоговый электрический сигнал определенной величины.

Как видно из рис. 158, в УВМ поступает и выдается по каналам связи с объектом много сигналов, и каждый из них должен быть преобразован в цифровую форму или наоборот. В современных АСУТП эти операции производятся групповым способом — один АЦП или один ЦАП поочередно преобразует сигналы одной группы. Соответствующие сигналы подключают ко входу АЦП или снимают с выхода ЦАП поочередно с помощью коммутатора, управляемого от УВМ. Скорость коммутации сигналов и скорость их преобразования в АЦП выбирается достаточно большой, так чтобы за один цикл коммутации всех сигналов из группы они не успевали заметно измениться.

Отдельную группу технических средств АСУТП составляют устройства связи УВК с оператором и устройства отображения информации. С помощью этих устройств оператор системы или программисты (при отладке машинных программ) могут наблюдать за ходом технологического процесса, судить о работе систем управления, запрашивать и вводить в УВМ необходимую информацию и команды.

Основным способом представления текущей информации в современных АСУТП является отображение ее на экране дисплея в виде текста, таблиц или графиков. На экран дисплея можно вывести любую информацию, имеющуюся в памяти УВМ — текущие или усредненные значения измеряемых технологических параметров, величины управляющих воздействий, таблицы или графики изменения управляемых параметров во времени, сообщения о нарушениях технологического регламента и неисправностях в системе и т. п. В достаточно сложных и больших АСУТП может быть несколько дисплеев, устанавливаемых как в машинном зале, так и на значительном удалении от УВМ, например, на рабочих местах в заводском цехе или в кабинете главного инженера.

Дисплей, при всем удобстве представления информации, обладает одним недостатком — эта информация не регистрируется и поэтому не может быть использована в дальнейшем для анализа качества работы АСУТП. Для регистрации основных параметров, характеризующих ход управления технологическим процессом, применяют автоматические печатающие устройства. Печатающее устройство представляет собой пишущую машинку, которая автоматически воспроизводит на бумаге алфавитно-цифровой текст по командам из УВМ.

Кроме описанных основных устройств в комплекс технических средств АСУТП входят также устройства (модули) связи между отдельными элементами системы и отдельными УВМ, источники питания, средства сигнализации и др.

### Контрольные вопросы

1. Из каких основных частей состоит УВК? УВМ?
2. Для чего УВМ необходима память?
3. Как производится ввод в УВМ сигналов от датчиков? вывод управляющих воздействий на объект?
4. Какую информацию целесообразно выводить на экран видеотерминала и на печатающее устройство в АСУТП получения обжигового газа?

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Для дополнительного чтения рекомендуем следующие книги:

1. Мелюшев Ю. К. Основы автоматизации химических производств и техника вычислений: Учеб. для техникумов. 2-е изд. М.: Химия, 1982. 360 с.
2. Шкатов Е. Ф. Технологические измерения и КИП на предприятиях химической промышленности: Учеб. для средних спец. учеб. завед. М.: Химия, 1986. 320 с.
3. Голубятников В. А., Шувалов В. В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности: Учеб. для средних спец. учеб. завед. М.: Химия, 1985. 352 с.
4. Барласов Б. З., Ильин В. И. Наладка приборов и систем автоматизации: Учеб. для средних ПТУ. 3-е изд. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
5. Залманзон Л. А. Беседы об автоматике и кибернетике. 2-е изд. стереотип. М.: Наука, 1985. 416 с.

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава I. ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ . . . . .</b>	<b>5</b>
§ 1. Основные понятия управления . . . . .	5
§ 2. Иерархия управления промышленным предприятием . . . . .	7
§ 3. Основные понятия регулирования . . . . .	9
§ 4. Виды автоматических систем регулирования . . . . .	14
§ 5. Обратная связь в автоматических системах регулирования . . . . .	19
§ 6. Устойчивость замкнутых систем регулирования . . . . .	23
<b>Глава II. ОСНОВЫ ТЕХНИКИ ИЗМЕРЕНИЙ . . . . .</b>	<b>30</b>
§ 7. Метрологические понятия . . . . .	30
§ 8. Элементы измерительной цепи . . . . .	32
§ 9. Метрологические характеристики измерительных преобразователей . . . . .	36
§ 10. Нагрузочный эффект в измерительных цепях . . . . .	43
§ 11. Методы измерений . . . . .	45
<b>Глава III. ЭЛЕМЕНТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ . . . . .</b>	<b>49</b>
§ 12. Механические элементарные преобразователи . . . . .	50
§ 13. Электрические элементарные преобразователи . . . . .	52
§ 14. Пневматические элементарные преобразователи . . . . .	59
<b>Глава IV. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ . . . . .</b>	<b>65</b>
§ 15. Промежуточные преобразователи . . . . .	65
§ 16. Измерительные приборы . . . . .	78
<b>Глава V. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ . . . . .</b>	<b>88</b>
§ 17. Измерение давления . . . . .	89
§ 18. Измерение уровня . . . . .	93
§ 19. Измерение расхода и количества . . . . .	98
§ 20. Измерение температуры . . . . .	105
§ 21. Измерение свойств веществ . . . . .	111
§ 22. Измерение состава веществ . . . . .	118

<b>Глава VI.</b>	<b>АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ . . . . .</b>	<b>126</b>
§ 23.	Свойства объектов регулирования . . . . .	126
§ 24.	Качество регулирования в АСР . . . . .	135
§ 25.	Законы регулирования в АСР . . . . .	139
§ 26.	Настройка регуляторов по переходным процессам в АСР . . . . .	146
§ 27.	Элементы электрических регуляторов . . . . .	149
§ 28.	Элементы пневматических регуляторов . . . . .	155
§ 29.	Электрические регуляторы . . . . .	161
§ 30.	Пневматические регуляторы . . . . .	169
§ 31.	Микропроцессорные регуляторы . . . . .	177
§ 32.	Регулирующие органы . . . . .	180
§ 33.	Исполнительные механизмы . . . . .	183
§ 34.	Особые виды АСР . . . . .	187
<b>Глава VII.</b>	<b>ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ . . . . .</b>	<b>196</b>
§ 35.	Графическое оформление схем автоматизации . . . . .	196
§ 36.	Автоматическое регулирование основных технологических параметров . . . . .	201
§ 37.	Сигнализация, защита и блокировка в технологических процессах . . . . .	206
§ 38.	Назначение и функции АСУТП . . . . .	211
§ 39.	Технические средства АСУТП . . . . .	220
	<b>Библиографический список . . . . .</b>	<b>223</b>