

**В. С. Ужанский**

**Автоматизация холодильных  
машин и установок**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 62-63  
ББК 30.6  
В11

**В. С. Ужанский**  
В11 Автоматизация холодильных машин и установок / В. С. Ужанский – М.: Книга по Требованию, 2013. – 306 с.

**ISBN 978-5-458-32132-7**

В учебном пособии изложены основы автоматизации холодильных машин и установок, применяемых в различных отраслях народного хозяйства. Большое внимание уделено рассмотрению вопросов автоматизации основных элементов и узлов машин и установок: компрессоров, испарителей и конденсаторов. Специальный раздел посвящен приборам и средствам автоматизации, применяемым в холодильной технике. Рассмотрены схемы автоматизации наиболее распространенных агрегатов, машин и установок. Книга предназначена для студентов вузов, обучающихся по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки».

**ISBN 978-5-458-32132-7**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Развитие холодильной техники в последние десятилетия характеризуется как существенным совершенствованием и созданием принципиально новых машин и установок умеренного холода, так и быстрым внедрением их в различные отрасли народного хозяйства.

Современное состояние холодильной техники определяется несколькими основными факторами и прежде всего развитием конструкций холодильных компрессоров.

Поршневые компрессоры остаются основным по количеству типом. Однако в их конструкции произошли значительные изменения. Компрессоры стали быстроходными, частота вращения вала повышена до 1500—3000 об/мин, узлы подвергаются повышенным нагрузкам. Широкое распространение получили компрессоры со встроенными электродвигателями — герметичные и бессальниковые, причем наблюдается тенденция к увеличению их холодопроизводительности. Многие поршневые компрессоры снабжаются устройствами для изменения холодопроизводительности.

Главными преимуществами винтовых компрессоров являются высокая надежность и долговечность, простота регулирования и малая материалоемкость. Холодопроизводительность винтовых компрессоров от сотни до полутора тысяч киловатт.

Центробежные компрессоры предназначены для самых крупных машин. Их единичная холодопроизводительность достигает 10 и более тысяч киловатт. Современные центробежные компрессоры снабжены устройствами для изменения холодопроизводительности в широких пределах.

Существенным изменениям подвергается и теплообменная аппаратура.

Широкое распространение получают кожухотрубные испарители с внутритрубным кипением, интенсивные воздухоохладители, конденсаторы воздушного охлаждения и др.

Наряду с компрессионными машинами создаются и крупные теплоиспользующие машины, в частности водоаммиачные и бромистолитиевые, которые могут работать от источников тепла

с низким потенциалом и способствовать более рациональному и экономному использованию энергии.

Развитие холодильного оборудования потребовало и соответствующего подхода к вопросам его автоматизации. Цель автоматизации — повышение экономической эффективности оборудования и обеспечение безопасности при его работе.

Устройства автоматики повышают экономичность эксплуатации главным образом вследствие уменьшения затрат труда на обслуживание, повышения производительности труда персонала. Отказ от непрерывного обслуживания установок на предприятиях—потребителях холода позволил бы высвободить десятки тысяч квалифицированных рабочих.

Работы по автоматизации проводятся на разных этапах создания холодильного оборудования.

В настоящее время подавляющее большинство холодильных машин комплектуются приборами и средствами автоматизации при изготовлении на заводах. Эти машины могут полностью функционировать на объектах эксплуатации без каких-либо доделок.

В то же время в ряде отраслей промышленности и транспорта из отдельных машин и агрегатов создаются крупные разветвленные установки. Важную роль здесь играют проектные организации, которые наряду с технологическими процессами создают и системы автоматизации. Ныне крупными потребителями холодильного оборудования наряду с пищевыми отраслями промышленности и торговли являются химическая и нефтехимическая, сельское хозяйство, промысловый и транспортно-рефрижераторный флот, железнодорожный транспорт, системы кондиционирования воздуха и др.

Многообразие потребителей затрудняет унификацию оборудования и проектных решений, неоправданно расширяет номенклатуру приборов и средств автоматизации.

Вместе с тем при комплексном подходе к автоматизации многие технические решения можно унифицировать.

Все сказанное показывает, что в современных условиях возрастает роль инженеров-холодильщиков в решении комплексных задач по созданию высокоэффективного автоматизированного холодильного оборудования.

Предлагаемое учебное пособие имеет целью систематизировать накопленный опыт по автоматизации холодильных машин и установок и ориентировать будущих специалистов в вопросах, находящихся на стыке холодильной техники и техники автоматизации.

Книга является вторым переработанным изданием учебного пособия, вышедшего в 1973 г.

Книга знакомит читателя с основными принципами автоматизации холодильных машин и установок различных классов, устройством основных приборов и средств автоматики, а также

с наиболее характерными схемами автоматизированных машин и установок.

Общее построение книги сохранено, в то время как содержание претерпело существенные изменения. Больше внимания уделено основной задаче автоматизации и способам ее решения, расширен и углублен материал по автоматизации компрессоров, испарителей и конденсаторов. Рассмотрены новые приборы и средства автоматизации, разработанные и освоенные в последние годы. Приведены схемы автоматизированных машин и установок, получивших распространение в настоящее время.

Учебное пособие рассчитано на студентов вузов, обучающихся по специальности 0529 «Холодильные и компрессорные машины и установки» и специализирующихся по установкам умеренного холода, но оно может быть полезно и специалистам, работающим в этой области.

Автор приносит благодарность проф. И. П. Усюкину и доц. К. Д. Кану (Московский институт химического машиностроения), просмотревшим рукопись и сделавшим ряд ценных замечаний.

Отзывы и пожелания просьба направлять по адресу: 113035, Москва, 1-й Кадашевский пер., д. 12, издательство «Легкая и пищевая промышленность».

# **РАЗДЕЛ А. ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН И УСТАНОВОК**

---

В современной технике под автоматизацией понимают комплекс технических мероприятий, частично или полностью исключающих участие людей в том или ином технологическом процессе. Говоря об автоматизации холодильных машин и установок, обычно имеют в виду автоматизацию их работы в период эксплуатации.

Автоматизацию холодильных машин и установок осуществляют в целях повышения их экономической эффективности и обеспечения безопасности работы людей. Повышение экономической эффективности достигается вследствие уменьшения эксплуатационных расходов и затрат на ремонт оборудования, а безопасность эксплуатации — применением автоматических устройств, защищающих установки от работы в опасных режимах.

Различают две степени автоматизации: частичную и полную.

При частичной автоматизации устройства автоматики управляют только некоторыми технологическими операциями. Поэтому требуется непрерывное обслуживание и наблюдение со стороны технического персонала. Однако по сравнению с неавтоматизированной установкой трудоемкость обслуживания установок уменьшается.

При полной автоматизации устройства автоматики управляют всеми основными процессами, что позволяет отказаться от непрерывного обслуживания. Обслуживание может быть периодическим (один раз в сутки, в неделю и т. д.) или по необходимости (участие персонала только в ликвидации ненормальностей).

Деление на две степени автоматизации в некоторой степени условно, так как в большинстве установок, которые могут в течение определенного времени функционировать без вмешательства персонала, остаются операции обслуживания, выполняемые вручную (проверка и обеспечение плотности соединений, выпуск масла из аммиачных систем, профилактический осмотр и проверка узлов и агрегатов и т. д.).

## **Глава I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Автоматизированная холодильная установка содержит одну или несколько отдельных систем автоматизации, каждая из которых выполняет определенную функцию. Все эти системы содержат автоматические устройства, и, кроме того, в них имеются общие устройства, объединяющие работу отдельных систем.

### **СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ**

Системой автоматизации называют совокупность объекта автоматизации и автоматических устройств, позволяющих управлять работой этого объекта без участия персонала.

Объектом автоматизации могут быть машина или установка в целом, либо отдельные ее агрегаты, узлы, аппараты и т. д. Объект характеризуется



выходной, или регулируемой величиной и ее связью с входным, или регулирующим (управляющим), воздействием.

Системы автоматизации могут быть замкнутыми и разомкнутыми.

## Замкнутая система

Замкнутая система состоит из объекта  $Об$  и автоматического устройства  $А$  (рис. 1), которые соединены между собой прямой  $ПС$  и обратной  $ОС$  связями. По прямой связи к объекту подводится входное воздействие  $x$ , по обратной — выходная величина воздействует на автоматическое устройство.

Система этого вида работает по отклонению фактической величины  $y$  от заданного значения  $y_z$ .

Если назначение системы — поддерживать величину  $y$  около заданного значения при изменениях внешнего воздействия  $f_{вн}$ , то такую систему называют системой автоматического регулирования (САР), а автоматическое устройство — автоматическим регулятором (АР).

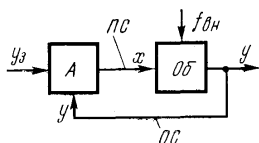


Рис. 1. Укрупненная схема замкнутой системы автоматизации

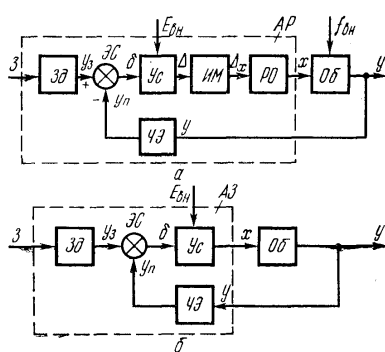


Рис. 2. Функциональные схемы систем САР (а) и САЗ (б)

Если нормальная работа объекта протекает при значениях  $y$ , отличающихся от  $y_n$ , а при достижении равенства между ними в объект посылается сигнал  $x$  на отключение или выполнение других операций, то такую систему называют системой автоматической защиты (САЗ), а автоматическое устройство — устройством защиты (АЗ).

Рассмотрим более подробно замкнутые системы САР и САЗ (рис. 2).

На функциональной схеме САР (рис. 2, а) показан состав и пояснены функции основных элементов.

В цепь прямой связи входят усилитель  $УС$ , исполнительный механизм  $ИМ$  и регулирующий орган  $РО$ . В цепь обратной связи включен чувствительный элемент  $ЧЗ$ .

С помощью чувствительного элемента автоматический регулятор  $АР$  воспринимает регулируемую величину  $y$  и преобразует ее в величину  $y_n$ , удобную для дальнейшей передачи. На один из входов элемента сравнения  $ЭС$  подается преобразованная величина  $y_n$ , а на другой его вход — сигнал  $y_z$  от задатчика  $ЗД$ . Этот сигнал в преобразованном виде представляет собой задание  $З$  регулятору. В элементе сравнения осуществляется вычитание, в результате которого получается величина отклонения (рассогласования)

$$\delta = y_z - y_n.$$

Величина  $\delta$  может быть равной нулю только в том случае, когда регулируемая величина равна заданному значению. Во всех остальных случаях она больше или меньше нуля. При этом знак величины  $\delta$  указывает на направление фактического отклонения, а ее значение, как правило, пропорционально этому отклонению.

Сигнал  $\delta$  является побуждающим для работы остальных элементов регулятора. В усилителе его мощность увеличивается вследствие подвода внешней энергии  $E_{вн}$  и в виде сигнала  $\Delta$  воздействует на исполнительный механизм, который преобразует усиленный сигнал отклонения в удобный для использования вид энергии  $\Delta_x$  (чаще всего в механический) и переставляет регулирующий орган. В результате изменяется подводимый к объекту поток энергии или вещества, что соответствует изменению регулирующего воздействия  $x$ . Для выполнения функций регулирования усилитель должен реагировать на знак  $\delta$ , а исполнительный механизм и регулирующий орган должны быть реверсивными.

Схема САЗ (рис. 2, б) отличается от схемы САР тем, что в автоматическом устройстве АЗ отсутствуют исполнительные механизмы и регулирующие органы. Дискретный сигнал от усилителя воздействует непосредственно на объект, выключая его целиком или отдельные его части.

## Разомкнутая система

Разомкнутой системой называют систему, в которой одна из связей (обратная или прямая) отсутствует.

Система без обратной связи (рис. 3, а) служит для управления объектом  $Об$ , которое осуществляется по косвенному параметру  $z$ . Этот параметр связан с выходной величиной  $y$  и воспринимается автоматическим устройством  $A$ . Отклонения  $z$  от заданного значения вызывают изменения воздействия  $x$ . Таким образом, автоматическое устройство должно содержать функциональный преобразователь, обеспечивающий формирование сигнала  $x$  в зависимости от  $z$ .

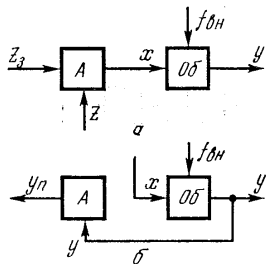


Рис. 3. Разомкнутые системы без обратной (а) и прямой (б) связи

Точность поддержания выходной величины  $y$  зависит от степени приближения функциональной связи между величинами  $z$ ,  $x$  и  $y$  к реальной связи между ними. Достаточно точное воспроизведение этих связей возможно с применением сложных решающих устройств или ЭВМ. Система может реализовываться и более простыми способами. Однако при этом достигается невысокая точность воспроизведения.

В некоторых разомкнутых системах в качестве косвенного параметра используют внешнее воздействие на объект  $f_{вн}$ .

Разомкнутые системы, в которых отсутствует прямая связь (рис. 3, б), предназначены для выполнения информационных функций, в основном для измерений (измерительная система) и сигнализации достижения заданных значений (сигнализирующая система). Управление объектом осуществляется человеком, который на основании полученной информации при необходимости изменяет регулирующее воздействие  $x$ . В автоматизированных установках измерительные и сигнализирующие системы служат для настройки и контроля за работой других систем автоматизации.

## КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Автоматические регуляторы классифицируют по типу задающего элемента, в зависимости от источника энергии, от способа воздействия на объекты, от связи между элементами и между отклонением и регулирующим воздействием.

По типу задающего элемента (датчика) автоматические регуляторы могут быть стабилизирующими, программными, следящими и оптимальными.

В стабилизирующих регуляторах установка датчика остается неизменной в течение длительного времени, в результате чего обеспечивается поддержание регулируемой величины на постоянном заданном уровне. Эти регуляторы могут иметь датчики и не иметь их, а следовательно, и элементов сравнения. Например, для большинства регуляторов уровня заданное значение определяется высотой установки датчика, которая в дальнейшем не изменяется.

В холодильной технике наиболее распространены стабилизирующие регуляторы.

В отличие от стабилизирующего программный регулятор обрабатывает переменное задание по заранее намеченной программе. Задание может измениться с помощью вращающегося кулачка определенного профиля, графика, изображенного на бумаге или пленке, и т. д.

Следящий регулятор получает задание, изменяющееся во времени по не известной заранее программе. К следящим регуляторам относят электронные мосты и потенциометры. Как и в любом измерительном приборе, положение стрелки в них должно соответствовать измеряемой величине, которая является заданным значением и может произвольно изменяться. Механизм, перемещающий стрелку, должен с минимальной погрешностью отрисовывать все изменения задающей (измеряемой) величины.

Оптимальные регуляторы имеют задающие устройства, содержащие кибернетические элементы. С помощью запрограммированных математических зависимостей, вводимых в задающее устройство, или путем последовательных проб определяется такое задание регулятору, которое при данных реальных условиях обеспечивает оптимальное ведение процесса (по производительности, стоимости, КПД или другим показателям).

В зависимости от источника энергии, приводящего в движение регулирующий орган, различают регуляторы прямого или косвенного действия.

В регуляторе прямого действия регулирующий орган перемещается под действием силы, развиваемой чувствительным элементом.

В регуляторах косвенного действия привод регулирующего органа может осуществляться вспомогательной энергией, подводимой извне, либо энергией, отбираемой от рабочей среды. Регуляторы с подводом вспомогательной энергии извне бывают электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные. Регуляторы без подвода вспомогательной энергии извне, обычно использующие давление рабочей среды до регулирующего органа, состоят из небольшого управляющего регулятора прямого действия (пилота) и специального исполнительного механизма. Клапан пилота выполняет функции усилителя и управляет работой основного регулирующего органа. Таким образом, хотя регулятор и снабжен усилителем, энергия извне к нему не подводится.

В зависимости от способа воздействия на объекты регуляторы могут быть плавного и позиционного действия.

В регуляторах плавного действия величина  $x$  может принимать любые значения в пределах между максимальным и минимальным. Так, регулирующий клапан, приводимый в движение электрическим или пневматическим исполнительным механизмом, может плавно изменять расход жидкости или пара.

В регуляторах позиционного действия величина  $x$  имеет два или несколько значений. Например, электромагнитный вентиль не занимает промежуточного положения, а может быть только открыт или закрыт.

В зависимости от связи между элементами системы могут быть непрерывными и импульсными.

Системы, в которых связь между элементами постоянна, т. е. каждый из элементов жестко присоединен к соседним, называют непрерывными (см. рис. 3).

Системы, в которых связь между любыми элементами не остается постоянной, а периодически размыкается, называют импульсными (прерывистыми). К таким устройствам относят многоточечные регуляторы. В них один усилитель обслуживает ряд регулирующих цепей, к которым он поочередно подключается. Каждая из цепей периодически на короткое время замыкается, а остальную часть периода остается разомкнутой.

В зависимости от характера связи между отклонением и регулирующим воздействием (иногда эту связь называют законом регулирования) различают пропорциональные и интегральные регуляторы.

Пропорциональный, или статический, регулятор (П-регулятор) характеризуется зависимостью

$$x = k\delta, \quad (1)$$

или

$$dx/d\tau = k d\delta/d\tau.$$

Из соотношения (1) видно, что величина воздействия  $x$  регулятора на объект пропорциональна отклонению  $\delta$ . Регулирующий орган останавливается, когда прекращается изменение регулирующей величины, т.е.  $dx/d\tau = 0$  при  $d\delta/d\tau = 0$ . Отсюда видно, что регулятор приходит в равновесие независимо от того, устранено отклонение или нет.

Интегрирующий, или астатический, регулятор (И-регулятор) характеризуется зависимостью

$$x = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int \delta d\tau, \quad (2)$$

или

$$dx/d\tau = \delta/T_{\text{и}}.$$

Рис. 4. Процессы регулирования в системах с пропорциональным и интегрирующим регуляторами при изменении внешнего воздействия

Уравнение (2) показывает, что регулятор приходит в равновесие ( $dx/d\tau = 0$ ) и останавливает регулирующий орган только при  $\delta = 0$ . Кроме того, скорость движения регулирующего органа или изменения регулирующего воздействия  $dx/d\tau$  пропорциональна отклонению  $\delta$ . В идеальном случае остаточное отклонение  $y$  такого регулятора отсутствует.

Графики (рис. 4) иллюстрируют различие процессов регулирования в системах с пропорциональным и интегрирующим регуляторами. В замкнутой системе внешнее воздействие на объект  $f_{\text{вн}}$  в момент  $\tau_0$  ступенчато изменяется от начального  $f_{\text{н}}$  до конечного  $f_{\text{к}}$  значения (верхний график). В системе с пропорциональным регулятором это вызывает переходной процесс, в результате которого величина  $y$  от значения  $y_{\text{н}}$  стремится к новому установившемуся значению  $y_{\text{к}}$  (средний график). Разность  $\sigma = y_{\text{к}} - y_{\text{н}}$  называют статической ошибкой системы или статизмом. Величина этой ошибки зависит от коэффициента усиления регулятора  $k$  [см. формулу (1)] и тем меньше, чем этот коэффициент больше (чем более чувствителен регулятор). В системе с интегрирующим регулятором изменению  $f_{\text{вн}}$  также сопутствует переходной процесс, однако величина  $y$  всегда стремится к заданному значению  $y_{\text{з}}$  (нижний график).

Рассмотренные два класса регуляторов являются основными. Для улучшения качества регулирования применяют следующие регуляторы с корректирующими (стабилизирующими) устройствами: пропорциональный регулятор с предварением, пропорционально-интегральный регулятор, пропорционально-интегральный регулятор с предварением. Эти устройства ускоряют переходные процессы и уменьшают динамические отклонения (перерегулирования).

Пропорциональный регулятор с предварением (ПД-регулятор), воздействует на объект не только по отклонению, но и по производным отклонениям

по времени. В результате регулятор до появления значительного отклонения начинает переставлять регулирующий орган и, следовательно, уменьшает динамические отклонения. Работа регулятора с воздействием по 1-й производной описывается уравнением

$$x = k\delta + k_y d\delta/d\tau.$$

Пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) формирует воздействие по отклонению и его интегралу. Как правило, этот регулятор в начале переходного процесса действует как пропорциональный, а в конце — как интегральный.

Уравнение этого регулятора:

$$x = k\left(\delta + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int \delta d\tau\right).$$

Пропорционально-интегральный регулятор с предварением (ПИД-регулятор) формирует воздействие по трем составляющим: по отклонению, его интегралу и 1-й производной. Его уравнение имеет вид

$$x = k\delta + k_y d\delta/d\tau + \frac{k}{T_{\text{и}}} \int \delta d\tau.$$

Несмотря на имеющиеся в пропорционально-интегральном регуляторе и пропорционально-интегральном регуляторе с предварением воздействия по отклонению, эти регуляторы являются астатическими, так как скорость  $dx/d\tau=0$  только при  $\delta=0$ . Регулирующий орган приходит в состояние покоя при отсутствии отклонения.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Под характеристикой элемента понимают зависимость выходной величины от входной. Для отдельного, имеющего один вход и один выход элемента системы характеристика определяется однозначно. Так, характеристика исполнительного механизма (см. рис. 2, а) имеет вид

$$\Delta x = f(\Delta),$$

а регулирующего органа —

$$x = f(\Delta_x)^*.$$

Если элемент имеет два входа и один выход, то характеристика приобретает вид функции двух независимых переменных. Так, для объекта *Об* она будет иметь вид

$$y = f(x, f_{\text{вн}}).$$

В некоторых случаях удобно разделять характеристики по каналам воздействия. Для того же объекта отдельные характеристики имеют вид:

$$\text{по каналу } x \quad y = f(x), \quad f_{\text{вн}} = \text{const};$$

$$\text{по каналу } f_{\text{вн}} \quad y = f(f_{\text{вн}}), \quad x = \text{const}.$$

Для системы в целом также можно составить характеристики, отражающие влияние всех внешних факторов. Система (см. рис. 3) имеет характеристику

$$y = f(y_{\text{з}}, f_{\text{вн}}, E).$$

---

\* Здесь и далее символом  $f$  будем обозначать некоторую функцию аргумента в скобках. Повторение этого символа не означает, что функции в разных выражениях идентичны.

Учитывая особенности каждой системы, можно положить постоянными некоторые из воздействий. Так, для стабилизирующего регулятора  $y_a = \text{const}$ . Если принять параметр источника энергии  $E$  также постоянным (например, напряжение электрической сети), то характеристика системы приобретает вид

$$y = f(f_{вн}).$$

Эта характеристика является наиболее существенной для системы регулирования, так как отражает связь между регулируемой величиной и действующими на объект внешними воздействиями.

В общем виде характеристика системы или ее элементов является функцией не только аргумента, но и его производных, т. е. представляет собой дифференциальное уравнение. Решение дифференциального уравнения описывает поведение выходной величины системы или элемента во времени при определенном изменении входной величины. Для этого часто пользуются скачкообразным, трапецидальным и другими видами изменения входной величины.

Характеристику, отображающую поведение элемента в неустановившемся, переходном режиме ( $dy/dt \neq 0$ ), называют динамической характеристикой. Динамические характеристики можно представить в виде переходных характеристик, передаточных функций и амплитудно-фазовых характеристик.

Переходной характеристикой называют уравнение  $y = f(\tau)$  при ступенчатом изменении величины  $x$ . Переходную характеристику можно получить решением дифференциального уравнения элемента, а также экспериментальным путем.

Передаточной функцией является отношение выходной и входной величин, выраженных в операторной форме, которую получают путем преобразования по Лапласу исходного дифференциального уравнения элемента.

Амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) представляет собой передаточную функцию, в которой оператор равен  $j\omega$ . АФХ можно получить экспериментально. Для этого элемент подвергают воздействию входного гармонического (синусоидального или косинусоидального) сигнала, фиксируя амплитуду и фазу выходного гармонического сигнала и сравнивая ее с амплитудой и фазой входного сигнала.

В отличие от рассмотренных динамических характеристик уравнение системы в установившемся состоянии ( $dy/dt = 0$ ) называют статической характеристикой.

## ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗВЕНЬЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Каждую автоматическую систему условно можно представить в виде набора элементарных звеньев. Для удобства используются некоторые наиболее распространенные виды звеньев, которые называют типовыми. Элементарные звенья отличаются друг от друга характеристиками. Звенья являются линейными, если их статические характеристики не зависят от режима работы, а поведение можно описать линейными дифференциальными уравнениями.

К линейным элементарным звеньям относят апериодическое (инерционное) звено I порядка, интегрирующее звено и звено запаздывания. Кроме того, часто встречаются нелинейные звенья (например, с релейными характеристиками).

### Апериодическое звено I порядка

Апериодическим звеном I порядка называют звено, дифференциальное уравнение которого имеет вид

$$Td\varphi/d\tau + \varphi = \gamma_\sigma \sigma + \gamma_\rho \rho. \quad (3)$$

В уравнении (3)  $\varphi$  — выходная величина звена, а  $\sigma$  и  $\rho$  — входные величины, одна из которых представляет собой регулирующее воздействие, дру-