

000
1752

АВТОМАТИЗАЦИЯ
ХИМИЧЕСКИХ
ПРОИЗВОДСТВ



Л. М. Полоцкий
Г. И. Лапшенков

АВТОМАТИЗАЦИЯ
ХИМИЧЕСКИХ
ПРОИЗВОДСТВ

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Основные условные обозначения	7
Введение	9
 <i>Глава I. Общие сведения об автоматических системах управления химическими производствами</i>	 12
1. Основные виды автоматических систем регулирования	12
2. Статика и динамика систем	18
3. Временные характеристики систем	23
4. Структурные схемы систем и их типовые динамические звенья	32
5. Передаточные функции систем	35
6. Частотные характеристики систем	42
 <i>Глава II. Объекты химической технологии</i>	 48
1. Виды объектов химической технологии, их математическое описание	48
2. Свойства объектов и их переходные процессы	53
3. Составление математического описания объекта	68
4. Экспериментальное определение свойств объекта	80
 <i>Глава III. Измерительные преобразователи, регуляторы, исполнительные устройства автоматических систем регулирования</i>	 90
1. Измерительные преобразователи и приборы	91
2. Автоматические регуляторы	111
3. Исполнительные устройства	127
 <i>Глава IV. Элементы расчета и анализа автоматических систем регулирования</i>	 136
1. Одноконтурные автоматические системы регулирования	136
2. Составление уравнений динамики автоматических систем регулирования объектов химической технологии	143
3. Исследование простых систем	148
4. Устойчивость автоматических систем регулирования химико-технологических объектов	162
 <i>Глава V. Выбор регуляторов и других элементов автоматических систем регулирования</i>	 175
1. Выбор регулируемых величин, управляющих воздействий и измерительных преобразователей	175

2. Выбор типа автоматического регулятора и определение параметров его настройки	176
3. Расчет исполнительных устройств	194
<i>Глава VI. Особые виды автоматических систем регулирования</i>	<i>197</i>
1. Системы двухпозиционного регулирования	197
2. Многоконтурные системы регулирования	205
3. Экстремальные системы регулирования	212
4. Регулирование объектов с запаздыванием	215
5. Системы управления дискретными процессами	220
<i>Глава VII. Автоматизация химико-технологических процессов и производств</i>	<i>223</i>
1. Проектирование систем и изображение средств автоматизации на функциональных схемах	223
2. Автоматизация гидромеханических процессов	235
3. Автоматизация тепловых процессов	240
4. Автоматизация массообменных процессов	251
5. Автоматизация реакторных процессов	268
6. Автоматизация производств химической технологии	269
7. Автоматизированные системы управления технологическими процессами	275
8. Экономическая эффективность систем автоматизации	279
Приложение 1	281
Приложение 2	284
Предметный указатель	290

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A	— амплитуда колебаний; площадь сечения или поверхности.
C	— емкость объекта; теплоемкость системы.
c	— удельная теплоемкость вещества.
D	— диаметр.
E	— энергия активации.
F	— объемный расход (приток) вещества; производительность аппарата.
g	— ускорение свободного падения.
I	— интегральная квадратичная ошибка регулирования.
K	— показатель адиабаты газа; коэффициент теплопередачи; константа скорости реакции.
k	— коэффициент усиления (передачи).
L	— уровень жидкости в аппарате, напор насоса.
l	— перемещение; длина.
M	— влажность; влагосодержание.
P	— давление.
p	— символ изображения по Лапласу.
Q	— состав продукта; концентрация вещества.
q	— тепловой поток; количество вещества.
R	— универсальная газовая постоянная.
r	— теплота фазового перехода; теплота реакции.
s	— скорость.
T	— температура; постоянная времени.
t	— время.
u	— задающее воздействие.
V	— объем.
W	— масса.
x	— регулирующее (управляющее) воздействие.
y	— регулируемая величина.
z	— возмущающее воздействие.
α	— вещественная часть комплексного корня; коэффициент теплоотдачи; коэффициент расхода дроссельного устройства.
β	— коэффициент при мнимой части комплексного корня.
Δ	— приращение; рассогласование; разность; зона; диапазон.
δ	— жесткость пружины.
ε	— скорость разгона объекта.
ρ	— степень самовыравнивания; плотность вещества.
τ	— время запаздывания.
Φ	— перерегулирование.
ω	— частота колебаний.

ИНДЕКСЫ

B	— возмущающий.
BX	— входной.
$ВЫХ$	— выходной.
$Г$	— газ, горячий.

Д	— дифференцирующий.
дин	— динамический.
ж	— жидкость.
И	— интегрирующий.
ИП	— измерительный преобразователь.
ИУ	— исполнительное устройство.
к	— конечный.
м	— массовый.
н	— начальный (исходный) продукт (раствор); нагрузка.
о	— объект.
ос	— обратная связь.
П	— пропорциональный.
п	— пар; период колебаний.
пр	— приток; преобразователь; пары растворителя.
р	— регулятор; расход; реактор; раствор; равновесный.
с	— система; хладагент.
сп	— спай.
ст	— статический; стенка.
т	— текущий; тепловой; табличный.
тт	— термоэлектрический термометр.
ур	— упаренный раствор.
х	— холодный.
эксп	— экспериментальный.
тах	— максимальный.
min	— минимальный.
0	— начальное; заданное значение (до переходного процесса).
∞	— конечное значение (после переходного процесса).

ВВЕДЕНИЕ

Развитие автоматизации химической промышленности связано с возрастающей интенсификацией технологических процессов и ростом производств, использованием агрегатов большой единичной мощности, усложнением технологических схем, предъявлением повышенных требований к получаемым продуктам.)

Особое значение придается вопросам автоматизации процессов химической технологии в связи с взрыво- и пожаро-опасностью перерабатываемых веществ, их агрессивностью и токсичностью, с необходимостью предотвращения вредных выбросов в окружающую среду. Указанные особенности, высокая чувствительность к нарушениям заданного режима, наличие большого числа точек контроля и управления процессом, а также необходимость своевременного и соответствующего сложившейся в данный момент обстановке воздействия на процесс в случае отклонения от заданных по регламенту условий протекания не позволяют даже опытному оператору обеспечить качественное ведение процесса вручную.

Человек обладает конечной скоростью восприятия ограниченного объема информации; ему требуется некоторое время на ее обдумывание, принятие решения и выполнение соответствующих мероприятий. Действия человека отличаются субъективностью. Оператор должен непрерывно следить за процессом, с максимальной быстротой оценивать текущую обстановку и в случае необходимости принимать решения с целью поддержания заданного режима, что чрезвычайно сложно, а иногда и невозможно. Поэтому в настоящее время эксплуатация процессов химической технологии без автоматизации практически немыслима.

Под технологическим процессом понимают совокупность технологических операций, проводимых над исходным сырьем в одном или нескольких аппаратах, целью которых является получение продукта, обладающего заданными свойствами; осуществляются они в ректификационных колоннах, реакторах, экстракторах, абсорберах, сушилках и других аппаратах. Обычно с целью переработки химических веществ и получения целевых продуктов из этих аппаратов komponуют сложные технологические схемы.

Технологический процесс, реализованный на соответствующем технологическом оборудовании называют технологическим объектом управления (ТОУ). ТОУ это отдельный аппарат, агрегат, установка, отделение, цех, производство, предприятие. Различные внешние возмущающие воздействия (изменение расхода или состава исходного сырья, состояния и характеристик технологического оборудования и т. д.) нарушают работу ТОУ. Поэтому для поддержания его нормального функционирования, а также при необходимости изменения условий его работы, например, с целью ведения технологического процесса по некоторой программе или получения целевого продукта другого качества или состава, ТОУ нужно управлять. При этом цель управления заключается в обеспечении оптимального значения критерия управления, под которым понимается технологический или технико-экономический показатель (производительность установки, себестоимость продукции и др.)» характеризующий качество ТОУ в целом и принимающий числовые значения в зависимости от подаваемых на него управляющих воздействий — целенаправленных изменений материальных и энергетических потоков. Процесс управления предусматривает: сбор информации о текущем состоянии объекта управления; определение оптимального режима функционирования объекта; вычисление управляющих воздействий; реализацию оптимальных управляющих воздействий.

АСУ. В настоящее время для управления все шире применяют автоматизированные системы управления (АСУ) — человеко-машинные системы, обеспечивающие автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления. При этом под процессом оптимизации понимают выбор такого варианта управления, при котором достигается минимальное или максимальное значение некоторого критерия управления.

Сбор и оперативная обработка информации, вычисление критериев, нахождение оптимальных значений управляющих воздействий в этих системах осуществляется с помощью различных технических средств и электронных вычислительных машин. За управляющим персоналом остаются задачи осмысливания технологической или технико-экономической ситуации в целом и реализация управляющих воздействий.

Управление химическими предприятиями посредством АСУ осуществляется по иерархическому принципу на трех уровнях.

АСУ II. На высшем уровне обеспечивается оперативное управление химическим предприятием в целом, которое наряду с решением задач технологического управления отдельными производствами, координирует работу этих производств и решает планово-экономические задачи, обеспечивая эффективность работы всего предприятия. Для оперативного управления

химическими предприятиями разрабатываются автоматизированные системы управления предприятиями (АСУП).

АСУ ТП. На следующем уровне обеспечивается управление технологическим процессом. Для этого используется автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП), предназначенная для выработки и реализации управляющих воздействий на ТОУ в соответствии с принятым критерием управления. Задача управления в этом случае состоит в отыскании оптимальных режимов совместно работающих аппаратов, распределении нагрузок между отдельными агрегатами или параллельно работающими цепочками аппаратов с учетом имеющихся ресурсов сырья, энергии и других показателей. В АСУ ТП широко применяется весь арсенал современных средств автоматического управления, включая цифровые вычислительные машины.

При управлении технологическим процессом на уровне АСУ ТП информация о его протекании передается, также и на диспетчерские пункты предприятия, обеспечивающие ее анализ, обработку и использование в АСУП при управлении предприятием.

Локальные системы. На низшем уровне задача сводится к Стабилизации необходимых режимов процессов, протекающих в отдельных аппаратах, путем поддержания заданных значений характерных технологических величин (расход, температура, Тур, качественные показатели получаемых продуктов и др.). Кроме того, выполняется оптимизация процессов с учетом их особенностей (процесс проводится при условии максимальной выработки целевого продукта из единицы сырьевого материала, минимальных удельных затрат энергии на получение продукта заданного качества или при других условиях). Одновременно осуществляется сигнализация о нарушении заданного режима, защита и блокировка оборудования, его пуск и останов, дистанционное управление процессом и т.д. Эти задачи решаются с помощью локальных автоматических систем, входящих в АСУ ТП.

С усложнением задач, решаемых автоматизированной системой управления химическим предприятием в целом, возрастают требования к качеству работы локальных систем. Поэтому при автоматизации химических производств и предприятий в первую очередь необходимо создавать надежные и качественно работающие локальные автоматические системы.

В данной книге наибольшее внимание уделено работе систем последнего (низшего) уровня иерархии управления химическими предприятиями; приведены также некоторые сведения по АСУ ТП.

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ

1. Основные виды автоматических систем регулирования

Процессы химической технологии (при рассмотрении их с точки зрения задач управления) обычно представляют в виде динамических систем", поведение которых во времени определяется текущими значениями ряда характерных величин — расхода протекающих через аппараты веществ, их температуры, давления, концентрации и" др. При нормальном протекании процесса эти величины имеют определенные, так называемые номинальные значения.

В силу ряда внешних причин (изменение состава и расхода сырья, параметров тепло- и хладоагентов и др.) или явлений, протекающих в самом аппарате (изменение гидродинамической обстановки в аппарате, условий передачи тепла через поверхности, активности катализатора и др.), указанные величины могут отклоняться от номинальных значений. Это приведет к нарушению /процесса, снижению количества и качества получаемой продукции, интенсивному износу оборудования. Чтобы процесс протекал нормально, им нужно управлять.

Управление — это целенаправленное воздействие на объект, которое обеспечивает его оптимальное (в определенном смысле) функционирование и количественно оценивается величиной критерия (показателя) качества. Критерии могут иметь технологическую или экономическую природу (производительность технологической установки, себестоимость продукции или т. п.).

Различают величины входные x_p , z_e и выходные y_t . Под входными величинами объектов химической технологии понимают изменение расхода вещества, его состава, количества подаваемого тепла и т. п. К выходным величинам относятся температура вещества, его уровень в аппарате, давление, концентрация, влажность и др. Состояние объекта в каждый момент времени определяется значениями выходных величин y_t . Для нормального функционирования объекта они должны поддерживаться на определенном заранее заданном значении u_3 или изменяться по определенной программе.

Во время работы выходные величины отклоняются от заданных значений под действием возмущений z_e и появляется рассогласование между текущими y_t и заданными u_3 значениями

выходных величин объекта. Если при наличии возмущений z_6 объект самостоятельно обеспечивает нормальное функционирование, т. е. самостоятельно устраняет возникающее рассогласование $y_T - u_3$, то он не нуждается в управлении. Если же объект не обеспечивает выполнения условий нормальной работы, то для нейтрализации влияния возмущений на него налагают управляющее воздействие x_p , изменяя с помощью исполнительного устройства материальные или тепловые потоки объекта. Таким образом, в процессе управления на объект наносятся воздействия, которые компенсируют возмущения и обеспечивают поддержание нормального режима его работы.

Управление может быть ручным или автоматическим. При ручном управлении воздействие на химико-технологический объект через исполнительное устройство осуществляет человек (оператор), наблюдающий за ходом процесса (рис. 1-1,а). Оператор следит за отклонением режима работы объекта от требуемого и, в зависимости от этого отклонения, воздействует на исполнительное устройство таким образом, чтобы процесс удовлетворял заданным условиям. При автоматическом управлении (рис. 1-1,б) воздействие на объект осуществляется специальным автоматическим устройством в замкнутом контуре; Такое соединение элементов образует автоматическую систему управления. Частным случаем управления является регулирование.

Регулированием называют поддержание выходных величин объекта вблизи требуемых постоянных или переменных значений с целью обеспечения нормального режима его работы посредством подачи на объект управляющих воздействий.

Автоматическое устройство, обеспечивающее поддержание выходных величин объекта вблизи требуемых значений, называют автоматическим регулятором.

Обычно при исследовании систем под входными, выходными и промежуточными величинами понимают не их абсолютные значения, а относительные приращения, которые представляют собой отношения приращений соответствующих технологических величин к их базисным значениям. Под базисными понимают величины, находящиеся в равновесном состоянии при заданном

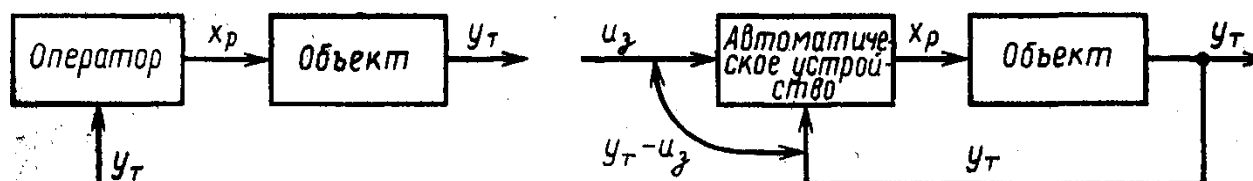


Рис. 1-1. Принципиальные схемы ручного (а) и автоматического (б) управления.

значении регулируемой величины. Используемые далее значения входных, выходных и промежуточных величин автоматических систем регулирования, объектов регулирования и автоматических регуляторов для наиболее распространенного случая, когда $u_3 = \text{const}$ и $y_0 = u_3$, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Обозначения величин автоматических систем регулирования, объектов регулирования и автоматических регуляторов

Наименование входных, выходных и промежуточных величин	Обозначение величин		
	До переходного процесса	В переходном процессе	После переходного процесса
Текущее значение регулируемой величины абсолютное	y_0	y_T	$x_{p\infty}$
То же, относительное	-	$y = \frac{y_T - y_0}{y_0}$	$x = \frac{x_{p\infty} - x_0}{x_0}$
Заданное значение регулируемой величины абсолютное	$u_3 = y_0$		
То же, относительное	$u = \frac{u_3 - y_0}{y_0} = 0$		
Отклонение регулируемой величины абсолютное	-	$\Delta y_T = y_T - y_0$	$y_{T\infty}$
То же, относительное	-	$\Delta y = \frac{y_T - y_0}{y_0}$	$y_{\infty} = \frac{y_{T\infty} - y_0}{y_0}$
Регулирующее воздействие относительное	x_0	x_p	$\Delta y_{T\infty} = y_{T\infty} - y_0$
То же, относительное	-	$x = \frac{x_p - x_0}{x_0}$	$\Delta y_{\infty} = \frac{y_{T\infty} - y_0}{y_0}$
Возмущающее воздействие абсолютное	z_0	z_B	$z_{B\infty}$
То же, относительное	-	$z = \frac{z_B - z_0}{z_0}$	$z_{\infty} = \frac{z_{B\infty} - z_0}{z_0}$

Для обеспечения нормальной работы различных по назначению и конструкции аппаратов и установок химической промышленности необходимо регулировать технологические величины: температуры, давления, расходы, уровни, концентраций и др. Автоматические системы регулирования (АСР), используемые для этой цели, классифицируют по нескольким характерным признакам.

По принципу регулирования АСР делят на действующие по отклонению, по возмущению и по комбинированному принципу.

По отклонению. В системах, работающих по отклонению регулируемой величины от заданного значения (рис. 1-2,а), возмущение z вызывает отклонение текущего значения регулируемой величины y от ее заданного значения u . Автоматический

регулятор АР сравнивает значения y и u , при их рассогласовании вырабатывает регулирующее воздействие x соответствующего знака, которое через исполнительное устройство (на рис. не показано) подается на объект регулирования ОР, и устраняет это рассогласование. В системах регулирования по отклонению для формирования регулирующих воздействий необходимо рассогласование, в этом состоит их недостаток, поскольку задача регулятора состоит именно в том, чтобы не допускать рассогласования. Однако на практике такие системы получили преимущественное распространение, так как регулирующее воздействие в них осуществляется независимо от числа, вида и места появления возмущающих воздействий. Системы регулирования по отклонению являются замкнутыми.

По возмущению. При регулировании по возмущению (рис 1-2, б) регулятор АР_в получает информацию о текущем значении основного возмущающего воздействия z_1 . При измерении его и несовпадении с номинальным значением u_0 регулятор формирует регулирующее воздействие x , направляемое на объект. В системах, действующих по возмущению, сигнал регулирования проходит по контуру быстрее, чем в системах, построенных по принципу отклонения, вследствие чего возмущающее воздействие может быть устранено еще до появления рассогласования. Однако реализовать регулирование по возмущению для большинства объектов химической технологии практически не представляется возможным, так как это требует учета влияния всех возмущений объекта ($z_1, z_2, \dots$) число которых, как правило, велико; кроме того, некоторые из них не могут быть оценены количественно. Например, измерение таких возмущений как изменение активности катализатора, гидродинамической обстановки в аппарате, условий теплопередачи через стенку теплообменника и многих других наталкивается на принципиальные трудности и часто неосуществимо. Обычно учитывают основное возмущение, например, по

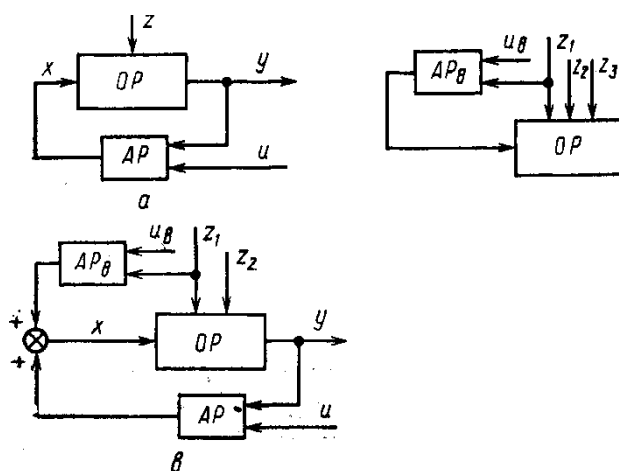


Рис. 1-2. Принципиальные схемы регулирования по отклонению (а), по возмущению (б) и по комбинированному принципу (в).

нагрузке объекта. Кроме того, в контур регулирования системы по возмущению сигналы о текущем значении регулируемой величины y не поступают, поэтому с течением времени отклонение регулируемой величины от номинального значения может превысить допустимые пределы. Системы регулирования по возмущению являются разомкнутыми.

По комбинированному принципу. При таком регулировании, т. е. при совместном использовании принципов регулирования по отклонению, и по возмущению (рис. 1-б,в), удастся получить высококачественные системы. В них влияние основного возмущения z_1 нейтрализуется регулятором AP_v , работающим по принципу возмущения, а влияние других возмущений (например, z_2 и др.) — регулятором AP , реагирующим на отклонение текущего значения регулируемой величины от заданного значения. Комбинированные АСР будут рассмотрены в **главе VI**.

По числу регулируемых величин АСР делят на одномерные и многомерные. Одномерные системы имеют по одной регулируемой величине, вторые — по несколько регулируемых величин.

В свою очередь многомерные системы могут быть разделены на системы несвязанного и связанного регулирования. В первых из них регуляторы непосредственно не связаны между собой и воздействуют на общий для них объект регулирования отдельно. Системы несвязанного регулирования обычно используются, когда взаимное влияние регулируемых величин объекта мало или практически отсутствует. В противном случае применяют системы связанного регулирования, в которых регуляторы различных величин одного технологического объекта связаны между собой внешними связями (вне объекта) с целью ослабления взаимного влияния регулируемых величин. Если при этом удастся полностью исключить влияние регулируемых величин одна на другую, то такая система связанного регулирования называется автономной.

По числу контуров прохождения сигналов АСР делят на одноконтурные и многоконтурные. Одноконтурными называются системы, содержащие один замкнутый контур, а многоконтурными — имеющие несколько замкнутых контуров. Многоконтурные АСР могут применяться и для регулирования одной величины с целью повышения качества переходного процесса (см. ниже).

По назначению (характеру изменения задающего воздействия) АСР подразделяются на системы автоматической стабилизации, системы программного управления и следящие системы.

Системы автоматической стабилизации предназначены для поддержания регулируемой величины на заданном значении, которое устанавливается постоянным ($u = \text{const}$). Это наиболее распространенные системы.

Системы программного управления построены таким образом, что заданное значение регулируемой величины представляет собой известную заранее функцию времени $u=f(t)$. Они снабжаются программными датчиками, формирующими величину u во времени. Такие системы используются при автоматизации химико-технологических процессов периодического действия или процессов, работающих по определенному циклу.

В следящих системах заданное значение регулируемой величины заранее не известно и является функцией внешней независимой технологической величины $u=f(y_1)$. Эти системы служат для регулирования одной технологической величины (ведомой), находящейся в определенной зависимости от значений другой (ведущей) технологической величины. Разновидностью следящих систем являются системы регулирования соотношения двух величин, например, расходов двух продуктов. Такие системы воспроизводят на выходе изменение ведомой величины в определенном соотношении с изменением ведущей. Эти системы стремятся устранить рассогласование между значением ведущей величины, умноженным на постоянный коэффициент, и значением ведомой величины.

По характеру регулирующих воздействий различают непрерывные АСР, релейные и импульсные.

Непрерывные АСР построены так, что непрерывному изменению входной величины системы соответствует непрерывное изменение величины на выходе каждого звена.

Релейные (позиционные) АСР имеют в своем составе релейное звено, которое преобразует непрерывную входную величину в дискретную релейную, принимающую только два фиксированных значения: минимально и максимально возможное. Релейные звенья позволяют создавать системы с очень большими коэффициентами усиления. Однако в замкнутом контуре регулирования наличие релейных звеньев приводит к автоколебаниям регулируемой величины с определенными периодом и амплитудой. Системы с позиционными регуляторами являются релейными (см. гл. VI).

Импульсные АСР имеют в своем составе импульсное звено, которое преобразует непрерывную входную величину в дискретную импульсную, т. е. в последовательность импульсов с определенным периодом их чередования. Период появления импульсов задается принудительно. Входной величине пропорциональны амплитуда или длительность импульсов на выходе. Введение импульсного звена освобождает измерительное устройство системы от нагрузки и позволяет применять на выходе маломощное, но более чувствительное измерительное устройство, реагирующее на малые отклонения регулируемой величины, что приводит к повышению качества работы системы.

В импульсном режиме возможно построение многоканальных схем, при этом уменьшается расход энергии на приведение в действие исполнительного устройства.

Системы с цифровым вычислительным устройством в замкнутом контуре регулирования также работают в импульсном режиме, поскольку цифровое устройство выдает результат вычисления в виде импульсов, следующих через некоторые промежутки времени, необходимые для проведения вычислений. Это устройство применяют, когда отклонение регулируемой величины от заданного значения должно вычисляться по показаниям нескольких измерительных приборов или когда в соответствии с критериями наилучшего качества работы системы необходимо вычислять программу изменения регулируемой величины.

Наряду с рассмотренными АСР химико-технологических процессов применяются также экстремальные системы.

Экстремальные системы. Оптимальный режим работы объекта характеризуется экстремальным (максимальным или минимальным) значением показателя эффективности процесса, протекающего в объекте. Таким показателем может быть либо технологическая величина, либо одна из экономических характеристик. Вследствие влияния возмущений оптимальный режим работы объектов нарушается. Системы стабилизации не способны скомпенсировать такие отклонения. Для отыскания оптимального режима служат экстремальные системы. Эта задача решается автоматическим поиском таких значений управляющих воздействий, которые соответствуют экстремальному значению показателя эффективности процесса. Системы, осуществляющие автоматический поиск нескольких управляющих величин объекта с целью обеспечения экстремального значения показателя эффективности протекающего в нем процесса, называются оптимальными. На практике же оптимизируемая величина объекта часто зависит не от нескольких, а от одной управляющей величины; такие оптимальные системы называют экстремальными системами регулирования.

2. Статика и динамика систем

Равновесные и неравновесные состояния систем. В промышленных условиях автоматические системы, а также их отдельные элементы, могут находиться в равновесных (статических) и неравновесных (динамических) состояниях. Равновесные -состояния характеризуются постоянством во времени входных, промежуточных и выходных величин. При эксплуатации объектов химической технологии равновесные состояния систем нарушаются в результате действия различных возмущений, при этом входные, промежуточные и выходные величины систем изменяются во времени; такое их состояние называют неравновесным. При изучении автоматических систем основное внимание уделяют их поведению в этом режиме.

Исследование систем в равновесных и неравновесных состояниях проводят с помощью различных функциональных зависимостей, характеризующих поведение систем. При этом под

входными и выходными величинами обычно понимаются относительные приращения, определяемые аналогично величинам, приведенным в табл. 1.1.

Уравнения статики и динамики. Поведение системы в установившемся состоянии определяется уравнениями статики, или статическими характеристиками. Под статической характеристикой понимают зависимость между входной $x_{вх}$ и выходной $x_{вых}$ величинами системы в равновесном состоянии

$$x_{вых} = f(x_{вх}) \quad (I,1)$$

Обычно уравнения статики являются алгебраическими.

Поведение системы в неравновесном состоянии или в переходном процессе описывается уравнениями динамики. В общем виде уравнение динамики или динамическая характеристика системы с входной $x_{вх}$ и выходной $x_{вых}$ величинами представляет собой зависимость типа

$$x_{вых} = f(x_{вх}, t) \quad (I,2)$$

Которая, как правило, представляет собой дифференциальное: уравнение. Прохождение сигнала по каналам системы характеризуется своими уравнениями статики и динамики.

Линеаризация уравнений. Поведение реальных систем обычно описывается нелинейными уравнениями. Решение таких: уравнений довольно сложно, нахождение даже приближенного численного решения требует большого объема вычислений. Поэтому при инженерных методах анализа и расчета реальных систем применяют линеаризацию уравнений: нелинейные уравнения заменяют приближенными линейными, решать которые значительно проще.

Часто нелинейной бывает лишь статическая характеристика системы или ее элементов. Так, нелинейную характеристик/ имеет резервуар для газа, входной величиной которого является степень открытия вентиля на линии поступления газа, 'и выходной — давление газа в аппарате.

Непрерывно дифференцируемую нелинейную статическую* характеристику можно линеаризовать, например, по методу малых отклонений. Для этого функцию разлагают в ряд Тейлора в окрестности точки, соответствующей нормальному (заданному) режиму работы системы, в данном случае это точка A с координатами $x_{вх0}$ и $x_{вых0}$ (рис. I-3).

$$x_{вых} = x_{вых0} + \frac{1}{1!} \cdot \left. \frac{dx_{вых}}{dx_{вх}} \right|_{x_{вх0}} (x_{вх} - x_{вх0}) + \frac{1}{2!} \cdot \left. \frac{d^2 x_{вых}}{d^2 x_{вх}} \right|_{x_{вх0}} (x_{вх} - x_{вх0})^2 + \dots \quad (I, 3)$$

Отбрасывая члены ряда, содержащие бесконечно малые величины второго и более высоких порядков, получим

$$x_{вых} = x_{вых0} + \left. \frac{dx_{вых}}{dx_{вх}} \right|_{x_{вх0}} (x_{вх} - x_{вх0})$$

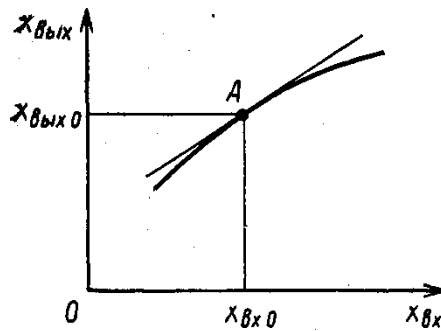


Рис. I-3. Линеаризация статической характеристики.

Эта зависимость представляет собой уравнение прямой линии, касательной к линеаризуемой функции при значении аргумента $x_{вх0}$. Введя обозначения

$$x_{вых} - x_{вых0} = \Delta x_{вых}; \quad x_{вх} - x_{вх0} = \Delta x_{вх}; \quad \left. \frac{dx_{вых}}{dx_{вх}} \right|_{x_{вх0}} = k$$

Получим

$$\Delta x_{вых} = k \Delta x_{вх} \quad (\text{I, 4})$$

Некоторые простые функции (произведение, частное от деления переменных x , y и др.) можно линеаризовать, подставив в них вместо переменных x , y выражения типа $(x_0 + \Delta x)$, $(y_0 + \Delta y)$. Выполнив математические операции, предписываемые линеаризуемыми функциями, и исключив из полученных зависимостей слагаемые, содержащие приращения второго и более высоких порядков, получают искомую линеаризованную функцию. Например, линеаризация произведения двух переменных проводится следующим образом:

$$z = xy = (x_0 + \Delta x)(y_0 + \Delta y) \approx x_0 y_0 + y_0 \Delta x + x_0 \Delta y$$

Принимая во внимание, что $x_0 y_0 = z_0$ найдем

$$\Delta z = z - z_0 = y_0 \Delta x + x_0 \Delta y$$

Аналогичным образом линеаризуют и уравнения динамики.

Линейные системы в статике и динамике описываются линейными уравнениями. Такие системы подчиняются принципу суперпозиции, или независимости возмущений. Он заключается в том, что реакция системы на сумму входных воздействий равна сумме реакций на каждое из воздействий в отдельности, т. е. каждая входная величина системы создает свою составляющую выходной величины независимо от изменения других входных величин. Это позволяет рассматривать поведение системы отдельно по каждому каналу прохождения сигнала.

Уравнение статики линейной системы имеет вид

$$x_{вых} = k x_{вх} \quad (\text{I, 5})$$

где $k = \text{const}$ — коэффициент усиления, или коэффициент передачи системы.

Расчет линейных систем в статике состоит в определении общего коэффициента усиления по значениям k отдельных ее

элементов или в нахождении других конструктивных либо технологических параметров отдельных элементов системы, необходимых для ее расчета.

Уравнение динамики линейной системы n -го порядка с одной входной и одной выходной величинами это неоднородное линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами:

$$a_0 \frac{d^n x_{\text{вх}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_{\text{вх}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + a_n x_{\text{вх}} = b_0 \frac{d^m x_{\text{вых}}}{dt^m} + a_1 \frac{d^{m-1} x_{\text{вых}}}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + b_m x_{\text{вых}} \quad (\text{I, 6})$$

где $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, a_n; b_0, b_1, \dots, b_{m-1}, b_m$; — постоянные коэффициенты, зависящие от параметров входящих в систему элементов; t — время.

В физически реализуемых системах порядок левой части этого уравнения выше или равен порядку правой части уравнения, т. е. $n \geq m$. В левой части уравнения группируют слагаемые, содержащие выходную величину и ее производные, а в правой — слагаемые с входной величиной и ее производными. При нескольких входных величинах все слагаемые, содержащие входные величины и их производные, записывают в правую часть уравнения. При наличии нескольких выходных величин поведение системы в переходном режиме описывают системой уравнений динамики, число которых равно числу выходных величин.

Решение уравнения динамики (I,6) представляет собой зависимость изменения выходной величины системы во времени при известном входном воздействии. По полученному решению определяют качество переходного процесса.

Уравнение динамики (I,6) при $x_{\text{вх}} = 0$ имеет вид:

$$a_0 \frac{d^n x_{\text{вх}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_{\text{вх}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + a_n x_{\text{вх}} = 0 \quad (\text{I, 7})$$

Это однородное уравнение. Оно характеризует поведение системы, предоставленной самой себе, после снятия внешних возмущений. Его называют уравнением свободного движения системы.

Из уравнения динамики (I, 6) можно получить уравнение статики системы, приравняв в нем все производные нулю. Оно имеет вид уравнения (I,5), если $k = b_m/a_m$.

Обычно, входные и выходные величины в уравнениях статики и динамики записывают в относительном виде. При этом постоянные коэффициенты уравнения динамики или безразмерны, или имеют размерность времени в степени, равной порядку производной соответствующего слагаемого.

Для упрощения записи уравнения динамики операцию дифференцирования обозначают символом p (здесь p — алгебраическая величина):

$$\frac{d}{dt} \equiv p; \frac{d^2}{dt^2} \equiv p^2; \dots; \frac{d^n}{dt^n} \equiv p^n;$$

Аналогично операцию интегрирования обозначают $1/p$:

Аналогично операцию интегрирования обозначают $1/p$:

$$\int \dots dt \equiv \frac{1}{p}; \int \int \dots dt^2 \equiv \frac{1}{p^2}; \dots; \int \int \dots \int \dots dt^n \equiv \frac{1}{p^n};$$

Таким образом

$$\frac{dx}{dt} \equiv px; \quad \frac{d^n x}{dt^n} \equiv p^n x; \quad \int x dt \equiv \frac{x}{p}; \quad \int \int \dots \int x dt^n \equiv \frac{x}{p^n}$$

Используя эти соотношения, получим следующую запись уравнения динамики системы (I, 6):

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) x_{\text{вх}} = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) x_{\text{вх}} \quad (\text{I, 8})$$

Заменяя полином в левой части уравнения (1,8) через $D(p)$ а в правой части через $K(p)$, окончательно получим

$$D(p) x_{\text{вх}} = K(p) x_{\text{вх}} \quad (\text{I, 9})$$

где $D(p)$ —полином, характеризующий свободные колебания системы; $K(p)$ —полином, характеризующий внешнее возмущение.

Переходные процессы. Изменение во времени выходной величины системы от момента нанесения возмущающего или задающего воздействий до прихода ее в равновесное состояние называют переходным процессом. Он зависит от динамических свойств системы, определяемых уравнением динамики, от входных воздействий и начальных условий. Переходный процесс $y(t)$ имеет составляющую свободного движения $y_c(t)$ определяемую свойствами системы и начальными условиями, и составляющую вынужденного движения $y_{\text{в}}(t)$ определяемую свойствами системы и видом воздействия. Таким образом

$$y(t) = y_c(t) + y_{\text{в}}(t) \quad (\text{I, 10})$$

В разных системах при одних и тех же возмущениях, в частности, при нанесении на систему кратковременного возмущения $z_{\text{в}}$, переходные процессы протекают различно.

При апериодическом сходящемся процессе (рис. 1-4, а) выходная величина y_t (см. табл. 1.1) плавно без колебания отклоняется от первоначального значения, и затем система постепенно возвращается в равновесное состояние. *При колебательном сходящемся процессе* (рис. 1-4, б) выходная величина системы совершает колебания с постепенно уменьшающейся амплитудой. *При колебательном гармоническом процессе*

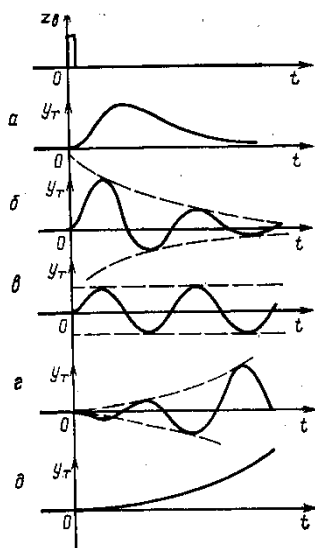


Рис. 1-4. Виды переходных процессов: а — аperiodический сходящийся; б — колебательный сходящийся; в — колебательный гармонический; г — колебательный расходящийся; д — аperiodический расходящийся.

(рис. 1-4, в) режим характеризуется постоянной амплитудой колебаний. При колебательном расходящемся процессе (рис. 1-4, г) амплитуда колебаний выходной величины системы постепенно возрастает со временем. Аperiodический расходящийся процесс (рис. 1-4,5) характеризуется непрерывно возрастающим отклонением выходной величины системы от равновесного значения.

Устойчивость. Под устойчивостью понимают свойство системы самостоятельно возвращаться к равновесному состоянию после устранения возмущения, нарушившего ее равновесие. Это означает, что свободная составляющая переходного процесса с течением времени должна стремиться к нулю, т. е.

$$\log_{t \rightarrow \infty}(t) \rightarrow 0 \quad (\text{I, 11})$$

Устойчивость является важным показателем работы системы. Не удовлетворяющие условию (I,11) системы неустойчивы. Работоспособными являются только устойчивые системы; для определения устойчивости исследуется уравнение (1,7).

При аperiodическом или колебательном сходящемся переходном процессе в системе (см. рис. 1-4, а, б) она устойчива, при аperiodическом или колебательном расходящемся (рис. 1-4, в, г) — неустойчива. Гармонический колебательный процесс условно рассматривают как устойчивый при небольшой амплитуде колебаний, допустимой по условиям технологического процесса. При амплитуде же колебаний, превышающей допустимые отклонения, систему считают неустойчивой.

3. Временные характеристики систем

Временная характеристика системы представляет собой изменение выходной величины во времени при подаче на ее вход типового аperiodического воздействия. В качестве последнего используют единичное ступенчатое воздействие, или единичный импульс. При единичном ступенчатом воздействии (рис. 1-5, а) входная величина мгновенно возрастает от нуля до единицы и далее остается неизменной. Единичное ступенчатое

воздействие, или единичная ступенчатая функция $1(t)$ описывается выражением:

$$1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (\text{I, 12})$$

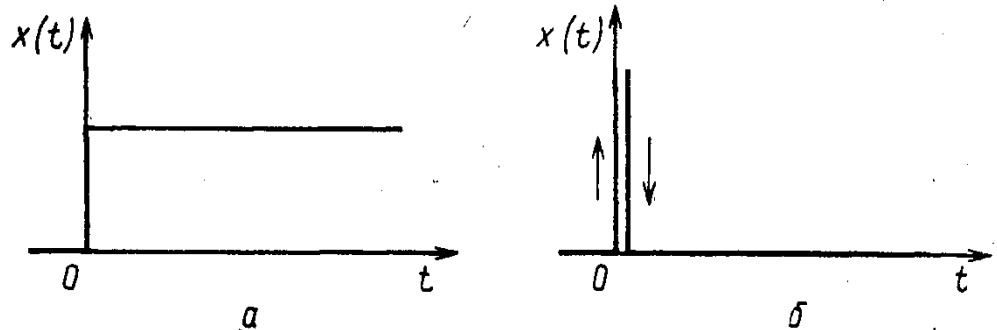


Рис. 1-5. Типовые аperiodические воздействия:

a — единичное ступенчатое воздействие; *б* — единичный импульс.

Импульс, величина которого равна бесконечности, длительность — нулю, а площадь — единице (рис. 1-5,б) называется единичным импульсом. Его аналитическое выражение называют единичной импульсной функцией, или дельта-функцией, и обозначают через $\delta(t)$.

Дельта-функцию при условии, что $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$ записывают так:

$$\delta(t) = \frac{d1(t)}{dt} \quad (\text{I, 14})$$

Переходная характеристика — это частный случай временной характеристики при подаче на вход элемента или системы единичного ступенчатого возмущения. Ее обозначают через $h(t)$. Таким образом, если $x_{\text{вх}}(t)=1(t)$, то $x_{\text{вых}}(t)=h(t)$.

Импульсная переходная характеристика — это временная характеристика при подаче на вход элемента или системы единичного импульса. Ее аналитическим выражением является импульсная переходная функция, или весовая функция (функция веса) $w(t)$. Следовательно, $x_{\text{вых}}(t)=w(t)$ при $x_{\text{вх}}(t)=\delta(t)$. Между переходной и весовой функциями линейных звеньев наблюдается зависимость, аналогичная вышеприведенной:

$$\omega(t) = \frac{dh(t)}{dt} \quad (\text{I, 15})$$

Качество переходного процесса определяется по показателям, которые характеризуют отклонение реального процесса от

желаемого; они показывают насколько точно и как быстро после нанесения единичного ступенчатого воздействия (при нулевых начальных условиях) в системе устанавливается равновесное состояние. Качество переходного процесса количественно оценивается следующими показателями (рис. 1-6).

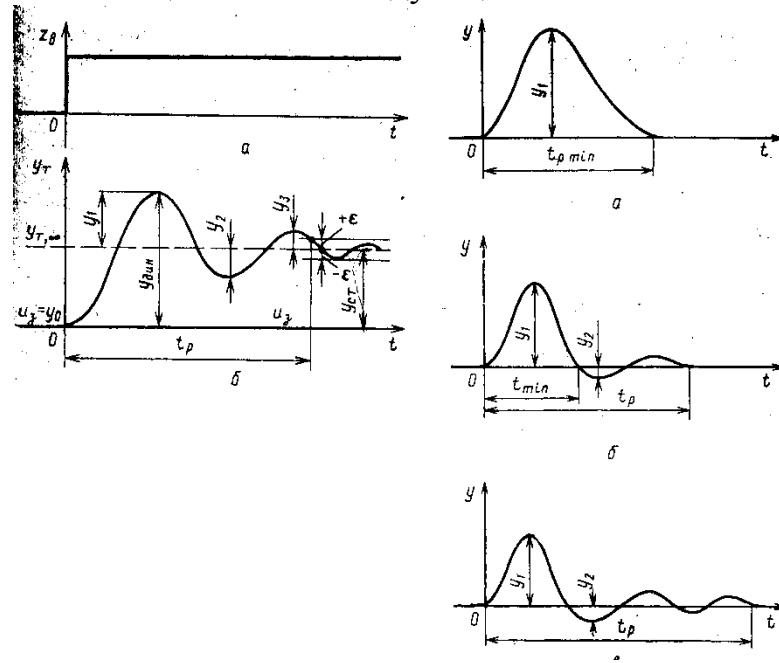


Рис. 1-6. Показатели качества переходного процесса в автоматических системах: а — единичное ступенчатое воздействие; б — переходный процесс.

Рис. 1-7. Типовые переходные процессы регулирования:

а — граничный аperiодический с минимальным временем регулирования; б — с 20%-ным перерегулированием; в — с минимальной квадратичной площадью отклонения: $\min \int_0^{\infty} y^2 dt$.

Статическая ошибка регулирования $y_{ст}$ есть рассогласование между установившимся значением регулируемой величины после переходного процесса и ее заданным значением

$$y_{ст} = y_{m,\infty} - u_3$$

или в относительных единицах

$$y_{ст} = y_{\infty} - u \quad (\text{I, 16})$$

Динамическая ошибка регулирования $y_{дин}$ есть максимальное отклонение регулируемой величины в переходном процессе от ее заданного значения

$$y_{дин} = y_{m,max} - u_3$$

или в относительных величинах

$$y_{дин} = y_{max} - u \quad (\text{I, 17})$$

Время регулирования t_p есть отрезок, в течение которого регулируемая величина достигает нового установившегося значения с некоторой заранее установленной точностью $\pm \epsilon$.

Перерегулирование представляет собой максимальное отклонение регулируемой величины от установившегося значения, выраженное в процентах, от y_{cm}

$$\varphi = \frac{y_{дин} - y_{cm}}{y_{cm}} 100\% \quad (\text{I, 18})$$

При расчетах автоматических систем регулирования технологических процессов перерегулирование переходного процесса оценивают также выраженным в процентах отношением второй и первой амплитуд колебаний, направленных в противоположные стороны.

Интегральная квадратичная ошибка регулирования представляет собой квадрат площади между кривой переходного процесса и новым установившимся состоянием системы:

$$I = \int_0^{\infty} (y - y_{\infty})^2 dt \quad (\text{I, 19})$$

Чем меньше статическая и динамическая ошибки, время регулирования и т. д., тем выше качество переходного процесса.

На форму и качество переходного процесса автоматической системы влияют свойства химико-технологического объекта, а также тип автоматического регулятора и степень его воздействия на объект. С усилением воздействия регулятора на объект переходный процесс, возникающий в системе, от апериодического начинает все больше видоизменяться в сторону затухающего колебательного, вплоть до гармонического колебательного процесса.

Типовые переходные процессы. Из устойчивых переходных процессов в качестве оптимального с точки зрения требований технологии выбирают один из трех типовых процессов:

границный апериодический процесс с минимальным временем регулирования $t_{p, \min}$ (рис. 1-7, а);

процесс с 20%-ным перерегулированием (рис. 1-7, б);

процесс с минимальной квадратичной площадью отклонения (рис. 1-7, в)

$$\min \int_0^{\infty} y^2 dt$$

Границный апериодический процесс характеризуется отсутствием перерегулирования, минимальным общим временем регулирования и наименьшим по сравнению с другими типовыми переходными процессами воздействием регулятора на объект (это наименьшее воздействие вызывает наибольшее отклонение регулируемой величины от заданного значения). Такой переходный процесс используется в качестве оптимального при

значительном влиянии регулирующего воздействия на другие технологические величины объекта при отклонении основной регулируемой величины для того, чтобы свести их отклонение к минимуму.

Процесс с 20%-ным перерегулированием характеризуется большей величиной регулирующего воздействия, чем в предыдущем случае, и меньшим отклонением регулируемой величины; при этом время регулирования несколько возрастает. Этот Процесс выбирается в качестве оптимального в случаях, когда Допустимо некоторое перерегулирование.

Процесс с минимальной квадратичной площадью отклонения регулируемой величины обладает значительным (до 40%) Перерегулированием, большим временем регулирования и наименьшей величиной максимального динамического отклонения регулируемой величины. Он имеет место при большей по сравнению с описанными выше процессами величине регулирующего воздействия и применяется в качестве оптимального, если Величина динамического отклонения параметра должна быть минимальной.

Переходные характеристики находят решая уравнения динамики системы или элемента при подаче на их вход соответствующего возмущения при заданных начальных условиях. Число начальных условий равно порядку уравнения динамики. Различают начальные условия для момента времени (-0) т. е. до подачи на систему возмущения, и для момента времени ($+0$), т.е. сразу же после нанесения возмущения. Все начальные условия для момента (-0), если система находится в состоянии равновесия, обычно равны нулю. По нулевым начальным условиям для момента (-0) конкретной системы и заданному возмущающему воздействию можно определить начальные условия для момента ($+0$). Естественно, что не все из этих начальных условий будут нулевыми. Начальные условия ($+0$) систем, уравнения движения которых имеют невысокий порядок при единичном ступенчатом воздействии, приведены в табл. 1.2

Таблица 1.2. Plusовые начальные значения для динамических систем невысокого порядка при воздействии 1 (t)

n	m	$y(+0)$	$\frac{dy(+0)}{dt}$	$\frac{d^2y(+0)}{dt^2}$
0	0	$\frac{b_0}{a_0}$	-	-
1	0	0	-	-
1	1	$\frac{b_0}{a_0}$	-	-
2	0	0	0	-
2	1	0	$\frac{b_0}{a_0}$	-
2	2	$\frac{b_0}{a_0}$	$\frac{b_1}{a_0} - \frac{a_1}{a_0} \cdot \frac{b_0}{a_0}$	-
3	0	0	0	0
3	1	0	0	$\frac{b_0}{a_0}$
3	2	0	$\frac{b_0}{a_0}$	$\frac{b_1}{a_0} - \frac{a_2}{a_0} \cdot \frac{b_0}{a_0}$

Уравнения динамики обычно решаются классическим методом или с применением метода операционного исчисления, основанного на функциональном преобразовании Лапласа.

Классический метод применяют для решения линейных дифференциальных уравнений движения, если их порядок не превышает трех, а также если правая часть уравнения выражается простой функцией (постоянная величина или синусоидальная функция времени); тогда определение частного решения не вызывает больших трудностей. В более сложных случаях целесообразнее использовать операционный метод, облегчающий нахождение переходного процесса систем.

Классический метод решения уравнения движения системы требует последовательного нахождения общего решения однородного уравнения $x_{\text{общ}}$, частного решения $x_{\text{част}}$ и общего решения неоднородного уравнения $x_{\text{вых}}$, которое представляет собой сумму

$$x_{\text{вых}} = x_{\text{общ}} + x_{\text{част}} \quad (\text{I, 20})$$

Полученное решение содержит постоянные интегрирования, которые находятся путем подстановки в решение (I,20) и в его производные заданных начальных условий. При этом число постоянных интегрирования в решении (I,20) и число заданных начальных условий должно быть равно порядку решаемого уравнения. В частности, для решения уравнения динамики n -го порядка должны быть заданы значения выходной величины системы и всех ее производных от первой до $(n-1)$ -й включительно при $t=+0$. С учетом значений найденных постоянных интегрирования зависимость (I,20) представляет собой искомое решение уравнения движения системы.

Операционный метод решения уравнений динамики систем предусматривает следующее: вначале исходное уравнение приводят к операторной форме, применяя преобразование Лапласа, с учетом заданных начальных условий; затем разрешают полученное алгебраическое уравнение относительно искомой величины, записанной в операторной форме, используя в случае необходимости свойства преобразования Лапласа [см. Приложение 1, выражения (3) — (15)]; и наконец, применяя операцию обратного преобразования Лапласа, находят решение исходного уравнения динамики в обычной форме.

Прямым преобразованием Лапласа функции $f(t)$ действительного временного t называется функция $F(p)$ комплексного

аргумента $p=\alpha+i\omega$, определяемая формулой

$$L[f(t)] = F(p) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt \quad (\text{I, 21})$$

где L — символ операции прямого преобразования Лапласа.

Функция $f(t)$ может быть преобразована по Лапласу, если при $t < 0$ она равна нулю, а при $t > 0$ — кусочно-непрерывна и возрастает не быстрее некоторой показательной функции $M \exp(p_0 t)$, где M и p_0 — постоянные: причем $M > 0$, а $p_0 \geq 0$. Последнее условие обеспечивает сходимость интеграла Лапласа (I,21). Обычно переходные процессы, протекающие в системах регулирования и являющиеся функцией времени, удовлетворяют этим трем условиям.

Функцию $f(t)$, подвергаемую преобразованию Лапласа, называют оригиналом, а функцию $F(p)$, вычисленную по уравнению (I,21), — изображением. Оригиналы обозначают строчными буквами, а изображения — прописными. Соответствие некоторых распространенных оригиналов и изображений также приведено в Приложении 1.

Уравнение динамики системы в операторной форме всегда проще исходного дифференциального уравнения. При этом оно учитывает начальные условия и отражает физическую картину переходного процесса в системе.

Для отыскания оригинала по соответствующему изображению $F(p)$ необходимо провести операцию обратного преобразования Лапласа, которая обозначается символом L^{-1} :

$$f(t) = L^{-1}[F(p)] = \frac{1}{2\pi i} \int_{q-i\infty}^{q+i\infty} F(p)e^{pt} dp \quad (\text{I, 22})$$

Вычисление этого интеграла сопряжено с большими трудностями. Поэтому если изображение $F(p)$ имеется в таблице или может быть приведено к табличному виду, то оригинал находят по таблице. В противном случае изображение $F(p)$ необходимо предварительно привести к форме, удобной для последующего нахождения оригинала.

В частности, для систем автоматического регулирования характерным является случай, когда изображение представляет собой дробно-рациональную функцию от p

$$F(p) = \frac{p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n} \quad (\text{I, 23})$$

при условии $n > m$

Это уравнение можно записать также следующим образом:

$$F(p) = \frac{B(p)}{(p - p_1)(p - p_2) \dots (p - p_{n-1})(p - p_n)}$$

$p_1, p_2, \dots, p_{n-1}, p_n$ — корни знаменателя $A(p)$ или полюсы дробно-рациональной функции $F(p)$.

Если все полюсы $F(p)$ не равны нулю, то при $t > 0$ оригинал $f(t)$ может быть найден по следующей формуле:

$$f(t) = L^{-1} \left[\frac{B(p)}{A(p)} \right] = \sum_{k=1}^n \frac{B(p_k)}{A'(p_k)} e^{p_k t} \quad (\text{I, 24})$$

где $A'(p)$ — первая производная от $A(p)$ по p ; k — целое положительное число ($k=1, 2, 3, \dots, n$)

Если один из полюсов, например p_1 , дробно-рациональной функции $F(p)$ равен нулю, то последняя может быть записана в виде:

$$F(p) = \frac{B(p)}{p A_1(p)}$$

где

$$A_1(p) = \frac{A(p)}{p - p_1} = (p - p_2)(p - p_3) \dots (p - p_{n-1})(p - p_n)$$

Оригинал $f(t)$ в данном случае находят по равенству:

$$f(t) = L^{-1} \left[\frac{B(p)}{p A_1(p)} \right] = \frac{B(0)}{A_1(0)} + \sum_{k=2}^n \frac{B(p_k)}{p_k A_1'(p_k)} e^{p_k t} \quad (\text{I, 25})$$

где $B(0)$ и $A_1(0)$ — соответственно равны $B(p)$ и $A(p)$ при $p = p_1 = 0$; $A_1'(p)$ — первая производная от $A_1(p)$ по p ; k — целое положительное число ($k=2, 3, 4, \dots, n$).

Если пара сопряженных полюсов расположена на мнимой оси плоскости p (обозначим эти полюсы через $\pm i\omega$), то дробно-рациональную функцию $F(p)$ представляют в виде:

$$F(p) = \frac{B(p)}{(p^2 + \omega^2) A_2(p)}$$

где

$$A_2(p) = \frac{A(p)}{(p^2 + \omega^2)} = (p - p_3)(p - p_4) \dots (p - p_{n-1})(p - p_n)$$

Оригинал в этом случае запишется так:

$$f(t) = L^{-1} \left[\frac{B(p)}{(p^2 + \omega^2) A_2(p)} \right] = \frac{B(i\omega)}{2(i\omega) A_2(i\omega)} e^{i\omega t} + \frac{B(-i\omega)}{2(-i\omega) A_2(-i\omega)} e^{-i\omega t} + \sum_{k=3}^n \frac{B(p_k)}{(p_k^2 + \omega^2) A_2'(p_k)} e^{p_k t} \quad (\text{I, 26})$$

где $B(\pm i\omega)$ и $A_2(\pm i\omega)$ соответственно равны $B(p)$ и $A_2(p)$ при $p = p_{1,2} = \pm i\omega$; $A_2'(p)$ — первая производная от $A_2(p)$ по p ; k — целое положительное число ($k=3, 4, 5, \dots, n$).

Определим переходные характеристики элементов системы классическим и операционным методами.

Пример I-1. Найти классическим методом переходную характеристику элемента системы, уравнение динамики которого имеет вид:

$$T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}} \quad (\text{I, 27})$$

при нулевых начальных условиях ($t=0$, $x_{\text{вых}}=0$).

Решение $x_{\text{вых}}$ находим в виде суммы общего $x_{\text{общ}}$ и частного $x_{\text{част}}$ решений.

Для нахождения общего решения напомним соответствующее исходному однородное уравнение

$$T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = 0$$

и характеристическое уравнение

$$Tp + 1 = 0$$

Корень характеристического уравнения $p = -1/T$. Общее решение запишем в виде

$$x_{\text{общ}} = Ce^{pt} = Ce^{-t/T}$$

где C — постоянная интегрирования.

Частное решение в данном случае определяется из равенства $x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$ и имеет вид:

$$x_{\text{част}} = k1(t)$$

В результате получаем решение

$$x_{\text{вых}} = x_{\text{част}} + x_{\text{общ}} = k1(t) + Ce^{-t/T}$$

Из начальных условий вычисляем постоянную интегрирования

$$C = -k1(t)$$

Подставляя выражение для C в решение, получим

$$x_{\text{вых}} = h(t) = k1(t)(1 - e^{-t/T}) \quad (\text{I, 28})$$

График этой переходной характеристики показан на рис. 1-8.

Пример 1-2. Найти операционным методом импульсную переходную характеристику элемента системы, рассмотренного в предыдущем примере, при нулевых начальных условиях.

Запишем уравнение динамики элемента (I, 27) в изображениях по Лапласу, используя выражения (3) — (5) из Приложения.

$$Tpx_{\text{вых}}(p) - Tx_{\text{вых}}(0) + x_{\text{вых}}(p) = kx_{\text{вх}}(p) \quad (\text{I, 29})$$

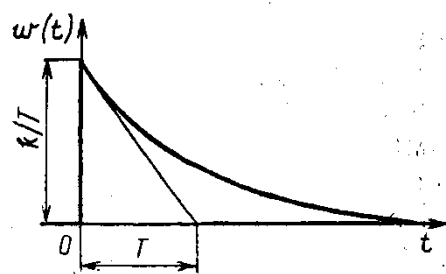
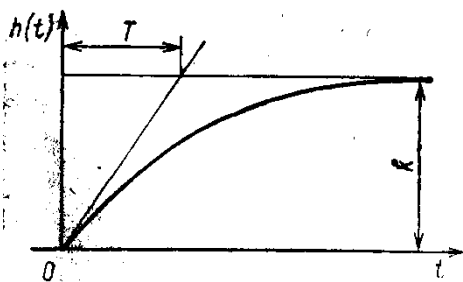


Рис. 1-8 Переходная характеристика (к примеру 1-1)

Рис. 1-9. Импульсная переходная характеристика (к примеру 1-2)

При нулевых начальных условиях $x_{\text{вых}}(0) = 0$ и с учетом равенства (17) (см. Приложение 1), уравнение (I,29) принимает вид:

$$(Tp + 1)x_{\text{вых}}(p) = k$$

Отсюда найдем изображение выходной величины по Лапласу

$$x_{\text{вых}}(p) = \frac{k}{Tp + 1}$$

По равенствам (3) и (20) из Приложения 1 находим соответствующий этому изображению оригинал

$$x_{\text{вых}} = \omega(t) = \frac{k}{t} e^{-\frac{t}{T}} \quad (\text{I, 30})$$

График импульсной переходной функции приведен на рис. 1-9.

4. Структурные схемы систем и их типовые динамические звенья

Для исследования различных по природе и конструкции систем регулирования с помощью единого математического аппарата их представляют в виде структурных схем. Такие схемы содержат узлы разветвления, узлы суммирования и динамические звенья (рис. I-10).

Узел разветвления. В таком узле входной сигнал $x_{\text{вх}}$ разделяется, не меняя своего значения, и направляется далее по нескольким каналам

$$x_{\text{вых}1} = x_{\text{вых}2} = \dots = x_{\text{вых}n} = x_{\text{вх}} \quad (\text{I, 31})$$

Где $x_{\text{вых}1}$, $x_{\text{вых}2}$, ..., $x_{\text{вых}n}$ — сигналы в выходных каналах узла разветвления.

Суммирующий узел, к которому подходит несколько сигналов $x_{\text{вх}1}$, $x_{\text{вх}2}$, ..., $x_{\text{вх}n}$ формирует на выходе только один сигнал $x_{\text{вых}}$, равный алгебраической сумме входных сигналов

$$x_{\text{вых}} = x_{\text{вх}1} + x_{\text{вх}2} + \dots + x_{\text{вх}n} \quad (\text{I, 32})$$

Динамическое звено. Проходя такое звено, входной сигнал $x_{\text{вх}}$ изменяет сигнал на выходе $x_{\text{вых}}$ по форме и величине (в некоторых случаях только по величине).

В основу классификации звеньев положены соответствующие уравнения динамики. Переходные процессы систем регулирования (пневматических, электрических, механических и др.), имеющих разную физическую природу и различное конструктивное оформление, но обладающих одинаковыми динамическими свойствами, подобны. Поэтому каждая такая система описывается одним или несколькими одинаковыми звеньями.

Большинство звеньев обладает направленностью действия (детектирующее свойство). Сигнал проходит через них только в одном направлении — с входа звена на его выход, в обратном направлении звено сигнал не пропускает. Например, изменение температуры рабочего спая термоэлектрического преобразователя приводит к изменению термоэлектродвижущей силы на его свободных концах.

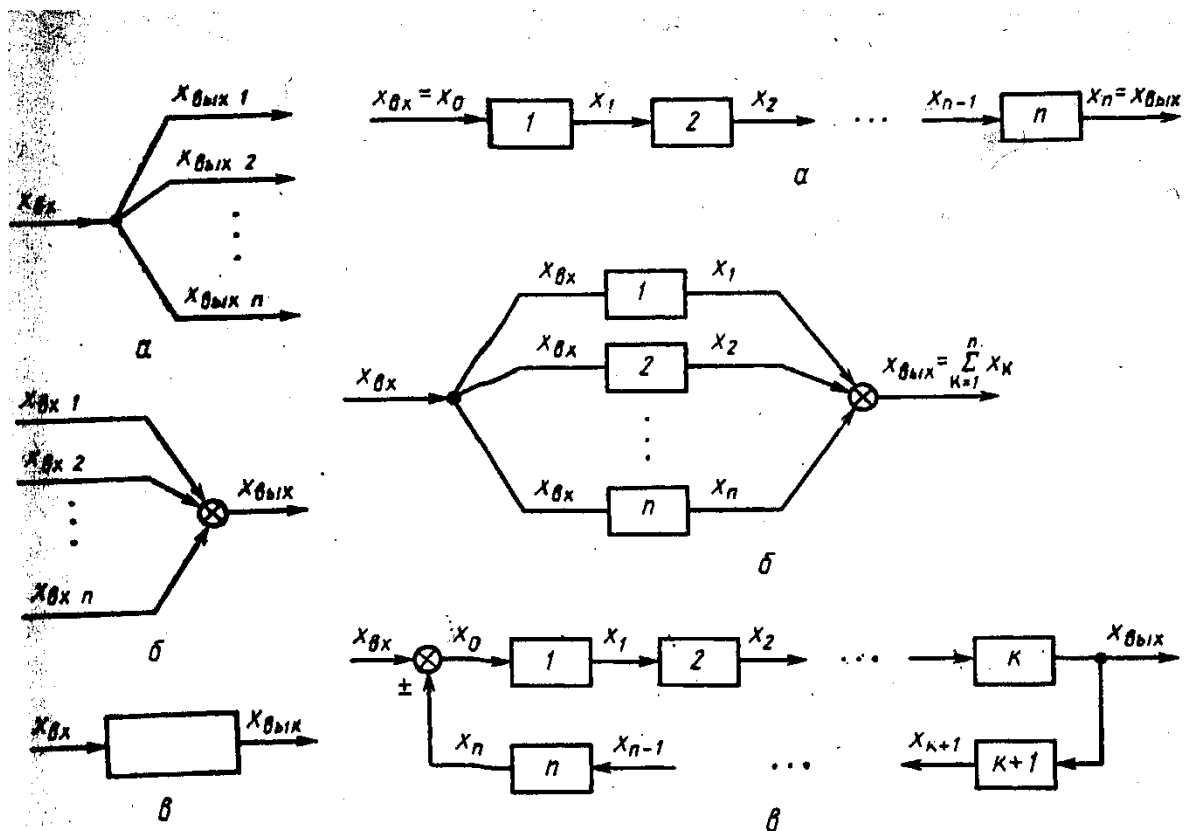


Рис. I-10. Элементы структурных схем:

а — узел разветвления; б — узел суммирования; в — динамическое звено.

Рис. I-11. Типы соединений звеньев:

а — последовательное; б — параллельное; в — по схеме с замкнутой обратной связью.

Звенья систем могут быть статическими и астатическими. У статического звена при постоянном входном воздействии выходная величина со временем устанавливается на постоянном значении, отличном от первоначального, а у астатического звена в установившемся режиме выходная величина непрерывно изменяется с постоянной скоростью или ускорением.

Динамические звенья называют типовыми, если изменение проходящего через них сигнала описывается алгебраическим или дифференциальным уравнением не выше 2-го порядка. Они имеют одну входную и одну выходную величину. Типовыми звеньями являются: усилительное, интегрирующее, дифференцирующее, апериодическое, колебательное и запаздывающее. В табл. I.3 приведены уравнения динамики указанных звеньев, их переходные характеристики и графики.

Соединения звеньев. В реальных системах звенья объединяют последовательно, параллельно, а также в соединения с замкнутой обратной связью (рис I-11). При последовательном соединении звеньев (рис. I-11, а) выходная величина предыдущего звена без искажения поступает на вход последующего звена. При таком соединении звеньев входной величиной является

Таблица 1.3. Основные характеристики типовых динамических звеньев

Звено	Уравнение динамики и переходная характеристика	График переходной характеристики
Усилительное	$x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}$ $h(t) = k$	
Интегрирующее	$x_{\text{вых}} = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t x_{\text{вх}} dt$ $h(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} t$	
Дифференцирующее	$x_{\text{вых}} = T_{\text{д}} \frac{dx_{\text{вх}}}{dt}$ $h(t) = T_{\text{д}} \delta(t)$	
Апериодическое I-го порядка	$T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}$ $h(t) = k(1 - e^{-t/T})$	
Колебательное	$T_1^2 \frac{d^2 x_{\text{вых}}}{dt^2} + T_2 \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}$ при $T_2 < 2T_1$ $h(t) = k \left[1 - e^{\alpha t} \left(\cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) \right]$ $\text{где } \alpha = -\frac{T_2}{2T_1^2}; \quad \omega = \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{2T_1^2}}$	
Запаздывающее	$x_{\text{вых}}(t) = x_{\text{вх}}(t - \tau)$	

входная величина первого по ходу сигнала звена, а выходной— выходная величина последнего из них.

При параллельном соединении звеньев (рис I-11; б) входной сигнал через узел разветвления поступает на входы всех элементарных звеньев. Выходные сигналы этих звеньев суммируются и направляются на выход соединения. При замкнутой обратной связи (рис. I-11, в) система состоит из двух цепочек звеньев, каждая из которых может представлять собой достаточно сложное соединение. По одной из этих цепочек сигнал проходит последовательно через звенья от входа соединения к его выходу, т.е. по прямой связи, а по другой — от выхода соединения к входу, т.е. по обратной связи. При этом на вход первой цепочки звеньев подается сигнал x_0 , равный сумме входной величины соединения $x_{вх}$ и выходной величины второй цепочки звеньев x_n

$$x_0 = x_{вх} + x_n \quad (I, 33)$$

Выходной величиной такого соединения $x_{вых}$ является выход k -го звена; одновременно этот же сигнал подается на вход $(k + 1)$ -го звена.

Если сигнал с выхода обратной связи и основной входной сигнал соединения действуют в одном направлении, то обратная связь называется положительной, а если эти сигналы действуют в противоположных направлениях — отрицательной.

Комбинации этих соединений звеньев позволяют представить любую сложную АСР химико-технологического процесса.

Выше рассматривались звенья и соединения только с одной входной и одной выходной величинами. Однако большое число реальных химико-технологических объектов, а также систем регулирования обычно представляют собой соединения звеньев, имеющих несколько входных и выходных величин. Такие соединения имеют несколько каналов прохождения сигналов.

5. Передаточные функции систем

Передаточные функции, как и уравнения динамики, характеризуют изменение сигнала при прохождении через систему.

Отношение Лапласовых изображений выходной и входной величин системы при нулевых начальных условиях называется передаточной функцией системы $W(p)$

$$W(p) = x_{вых}(p)/x_{вх}(p) \quad (I, 34)$$

где $x_{вх}(p)$ и $x_{вых}(p)$ — изображения по Лапласу входной и выходной величин системы.

По передаточной функции системы $W(p)$ и изображению ее входной величины можно найти изображение выходной величины

$$x_{вых}(p) = W(p)x_{вх}(p) \quad (I, 35)$$

При наличии одной входной и одной выходной величины система или звено имеют только один канал прохождения сигнала, а следовательно, и одну передаточную функцию. Если же система или звено имеют несколько каналов прохождения сигнала, что возможно при нескольких входных и выходных величинах, то прохождение сигнала в каждом канале характеризуется своей передаточной функцией.

Нахождение передаточных функций системы. Передаточные функции систем могут быть найдены по уравнениям динамики и по передаточным функциям звеньев системы.

По уравнению динамики передаточные функции находятся следующим образом. При нахождении, в частности, по уравнению (I,6) сначала запишем его в изображениях, используя зависимости (3) — (6), приведенные в Приложении 1:

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) x_{\text{вых}}(p) = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) x_{\text{вх}}(p) + U(p) \quad (\text{I, 36})$$

или обозначая полиномы в левой и правой частях уравнения через $D(p)$ и $K(p)$, получим

$$D(p) x_{\text{вых}}(p) = K(p) x_{\text{вх}}(p) + U(p) \quad (\text{I, 37})$$

где $U(p)$ — полином, определяемый начальными условиями системы. Полагая в уравнениях (I,36) и (I,37) начальные условия нулевыми [при этом $U(p)=0$], из равенств (I, 34), (I, 36) и (I,37) получим выражение для передаточной функции системы:

$$W(p) = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n} = \frac{K(p)}{D(p)} \quad (\text{I, 38})$$

Таким образом, передаточная функция систем, движение которых описывается уравнениями типа (I,6), является дробно-рациональной функцией независимого переменного p . В реальных системах автоматики степень полинома знаменателя в выражении (I,38) всегда выше или равна степени полинома числителя, т. е. $n \geq m$. Корни полинома числителя передаточной функции называют нулями, а корни полинома знаменателя — полюсами. При $p = 0$ передаточная функция системы вырождается в обычный коэффициент усиления системы.

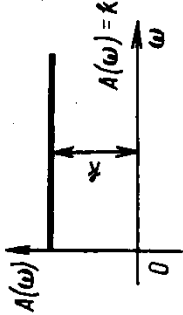
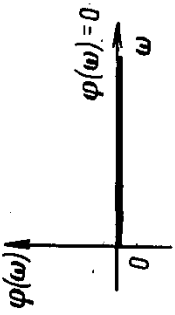
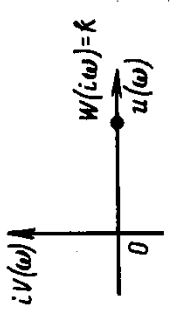
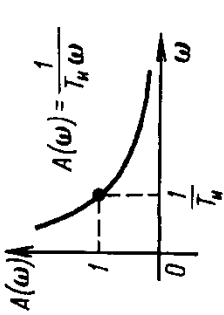
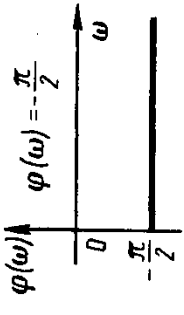
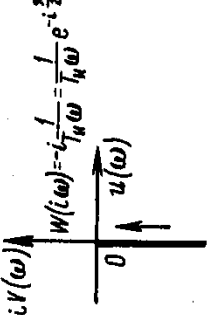
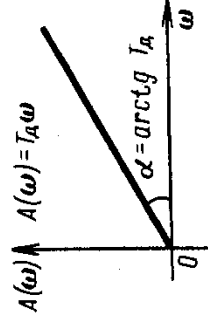
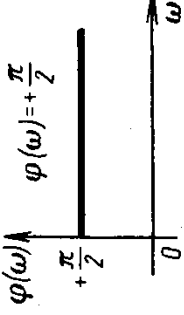
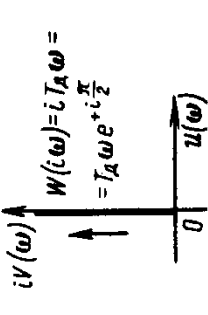
Отметим, что передаточная функция системы может быть также определена, как отношение полиномов правой и левой частей уравнения (I,9).

Пример I-3. Найти передаточную функцию апериодического звена, уравнение динамики которого имеет вид (I, 27).

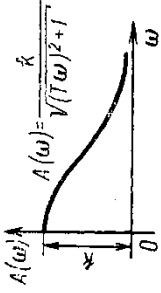
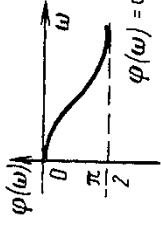
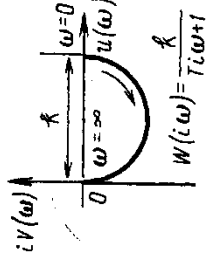
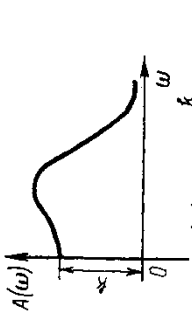
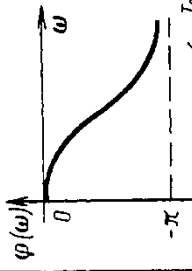
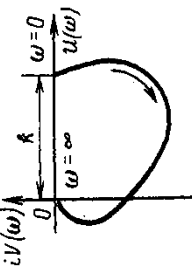
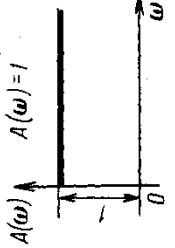
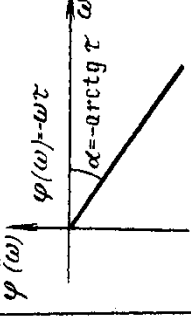
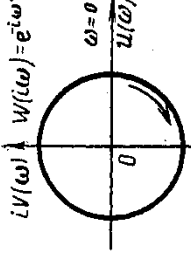
Для нахождения передаточной функции преобразуем исходное уравнение по Лапласу при нулевых начальных условиях и определим отношение Лапласовых изображений выходной и входной величин. Будем иметь

$$(Tp + 1) x_{\text{вых}}(p) = k x_{\text{вх}}(p) \\ W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{k}{Tp + 1} \quad (\text{I, 39})$$

Таблица 1.4. Передаточные функции и частотные характеристики типовых динамических звеньев

Звено	Передаточная функция	Характеристика	
		амплитудно-частотная	фаз-частотная
Усилительное	$W(p) = k$		
			
Интегрирующее	$W(p) = \frac{1}{T_n p}$		
			
Дифференцирующее	$W(p) = T_d p$		
			

Продолжение табл. I.4.

Звено	Передаточная функция	Характеристика		амплитудно-фазовая
		амплитудно-частотная	фазо-частотная	
Аперодическое I-го порядка	$W(p) = \frac{k}{Tp+1}$			
Колебательное	$W(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}$			
Запаздывания	$W(p) = e^{-p\tau}$			

Сравнивая уравнения (I,35) и (I,43), окончательно получим

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + \dots + W_n(p) = \sum_{k=1}^n W_k(p) \quad (\text{I, 44})$$

Таким образом, при параллельном соединении звеньев передаточная функция системы равна сумме передаточных функций входящих в нее звеньев.

Для нахождения передаточной функции соединения с замкнутой обратной связью (структурную схему см. на рис. 1-11, в) относительно величины $x_{\text{вых}}$ введем следующие обозначения: $W_1(p)$ —передаточная функция цепочки звеньев прямой связи; $W_2(p)$ — передаточная функция цепочки звеньев обратной связи. Тогда передаточные функции $W_1(p)$ и $W_2(p)$ можно выразить

$$W_1(p) = x_{\text{вых}}(p)/x_0(p) \quad (\text{I, 45})$$

$$W_2(p) = x_n(p)/x_{\text{вых}}(p) \quad (\text{I, 46})$$

При положительной обратной связи, когда сигналы прямой и обратной связей складываются, для суммирующего узла

$$x_0(p) = x_{\text{ex}} + x_n(p) \quad (\text{I, 47})$$

Из уравнений (I,45) и (I,46) найдем соответственно величины $X_0(p)$ и $X_n(p)$

$$x_0(p) = x_{\text{вых}}(p)/W_1(p)$$

$$x_n(p) = W_2(p)x_{\text{вых}}(p)$$

Подставляя полученные выражения в уравнение (I,47), имеем

$$\frac{x_{\text{вых}}(p)}{W_1(p)} = W_2(p)x_{\text{вых}}(p) + x_{\text{ex}}(p)$$

Сгруппируем в левой части члены, содержащие $x_{\text{вых}}(p)$

$$\left[1 - \frac{W_2(p)W_1(p)}{1}\right] x_{\text{вых}}(p) = W_1(p)x_{\text{ex}}(p)$$

Из последнего равенства найдем отношение $x_{\text{вых}}(p)/x_{\text{ex}}(p)$ которое и является искомой передаточной функцией

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{ex}}(p)} = \frac{W_1(p)}{1 - W_1(p)W_2(p)} \quad (\text{I, 48})$$

Таким образом, передаточная функция соединения с замкнутой положительной обратной связью представляет собой дробь, числитель которой равен передаточной функции цепочки звеньев прямой связи, а знаменатель — выражению: единица минус произведение передаточных функций цепочек прямой и обратной связей (или единица минус передаточная функция соединения в разомкнутом состоянии).

Для нахождения передаточной функции соединения с замкнутой отрицательной обратной связью, в котором сигналы прямой и замыкающей обратной связей вычитаются, можно воспользоваться уравнением (I,48) при условии изменения знака минус в знаменателе на плюс

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1+W_1(p)W_2(p)} \quad (\text{I, 49})$$

Однако, следует иметь в виду, что при расчете систем указанные знаки в знаменателе передаточных функций соединений (I,48) и (I,49) должны определяться с учетом знаков передаточных функций звеньев, входящих в эти соединения.

Аналогичным образом может быть найдено выражение для передаточной функции соединения с замкнутой обратной связью относительно любой промежуточной величины.

Характеристические уравнения. Знаменатель передаточной функции системы характеризует ее внутренние динамические свойства, отражает ее поведение в свободном состоянии; полином знаменателя $D(p)$ называют характеристическим. Согласно уравнению (1,38) для системы n -го порядка

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n \quad (\text{I, 50})$$

При последовательном и параллельном соединениях звеньев [см. уравнения (1,41) и (1,44)] знаменатель передаточной функции соединения равен произведению характеристических полиномов звеньев, входящих в это соединение

$$D(p) = \prod_{k=1}^n D_k(p) \quad (\text{I, 51})$$

Знаменатель передаточной функции $H(p)$ соединения с замкнутой обратной связью [см. уравнения (I,48) и (I,49)], выраженный через передаточные функции, равен

$$H(p) = 1 \mp W_1(p)W_2(p) \quad (\text{I, 52})$$

или в виде характеристического полинома

$$H(p) = D_1(p)D_2(p) \mp K_1(p)K_2(p) \quad (\text{I, 53})$$

Знаменатель передаточной функции системы или характеристический полином, приравненный нулю, представляет характеристическое уравнение системы, которое имеет вид:

$$D(p) = 0 \quad (\text{I, 54})$$

$$H(p) = 1 \mp W_1(p)W_2(p) = 0 \quad (\text{I, 55})$$

Общий вид характеристического уравнения системы n -го порядка в виде характеристического полинома можно представить следующим образом:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0 \quad (\text{I, 56})$$

Характеристические полиномы и характеристические уравнения служат исходным материалом при исследовании систем на устойчивость.

6. Частотные характеристики систем

Частотные характеристики определяют динамические свойства АСР и широко используются в инженерной практике для их расчета.

Если на вход системы подать гармонические колебания $x_{\text{вх}}$ (частота ω_i , амплитуда $A_{\text{вх}}$), которые в комплексной форме имеют вид

$$x_{\text{вх}} = A_{\text{вх}} e^{i\omega_1 t}$$

(здесь $e^{i\omega_1 t} = \cos \omega_1 t + i \sin \omega_1 t$) то на выходе этой системы через достаточно большой промежуток времени установятся вынужденные колебания $x_{\text{вых}}$ с той же частотой ω_i , но с другой амплитудой $A_{\text{вых1}}$ и со сдвигом по фазе φ_1 (рис. 1-12)

$$x_{\text{вых}} = A_{\text{вых1}} e^{i\omega_1 t} e^{i\varphi_1}$$

Отношение выходных колебаний системы $x_{\text{вых}}$ к входным $x_{\text{вх}}$, выраженное в комплексном виде, называют комплексным коэффициентом передачи системы при частоте

$$\frac{x_{\text{вых}}}{x_{\text{вх}}} = \frac{A_{\text{вых1}}}{A_{\text{вх}}} e^{i\varphi_1} = W(i\omega_1)$$

С изменением частоты колебаний на входе (при постоянной амплитуде $A_{\text{вх}}$) амплитуда выходных колебаний $A_{\text{вых}}$ и фазовый сдвиг φ будут меняться, что вызовет изменение комплексного коэффициента передачи системы.

Совокупность всех значений комплексного коэффициента передачи при изменении со 0 до $+\infty$ называют комплексной частотной характеристикой системы или амплитудно-фазовой характеристикой (АФХ) системы и обозначают через $W(i\omega)$.

Зависимость отношения амплитуд выходных и входных колебаний $A_{\text{вых}}/A_{\text{вх}}$ от частоты колебаний ω называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и обозначают через $A(\omega)$. Зависимость фазового сдвига выходных колебаний

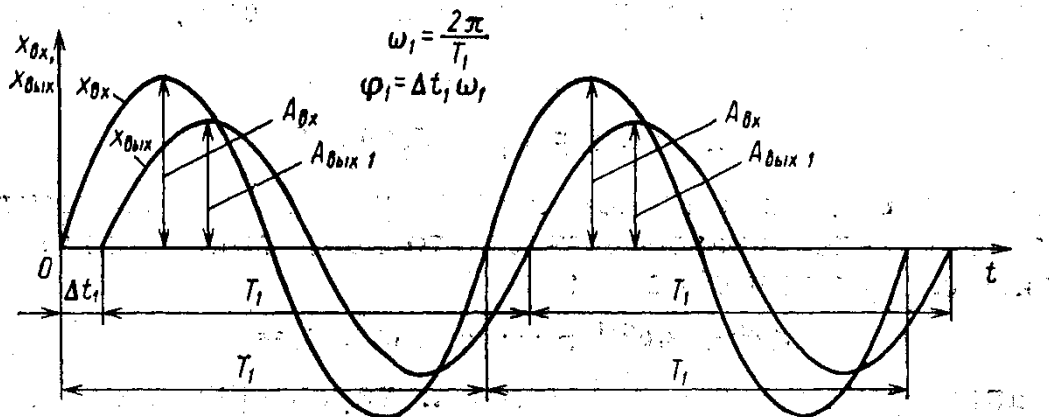


Рис. 1-12. График входных $x_{\text{вх}}$ и выходных $x_{\text{вых}}$ колебаний системы.

относительно входных φ от частоты колебаний ω называют фазо-частотной характеристикой (ФЧХ) и обозначают через $\varphi(\omega)$. Эти частотные характеристики связаны между собой уравнением

$$W(i\omega) = A(\omega)e^{i\varphi(\omega)} \quad (\text{I, 57})$$

Графически АФХ представляет собой кривую, описываемую на комплексной плоскости концом вектора, модуль которого равен значениями $A(\omega)$, а аргумент — $\varphi(\omega)$ при изменении ω от 0 до $+\infty$.

Проекцию АФХ на действительную ось комплексной плоскости называют вещественной частотной характеристикой (ВЧХ) и обозначают через $U(\omega)$, а проекцию на мнимую ось — мнимой частотной характеристикой (МЧХ) и обозначают через $V(\omega)$.

Частотные характеристики могут быть определены одна через другую с помощью следующих зависимостей:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} \quad (\text{I, 58})$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)} \quad (\text{I, 59})$$

$$U(\omega) = A(\omega)\cos \varphi(\omega) \quad (\text{I, 60})$$

$$V(\omega) = A(\omega)\sin \varphi(\omega) \quad (\text{I, 61})$$

$$W(i\omega) = U(\omega) + iV(\omega) = A(\omega)[\cos \varphi(\omega) + i \sin \varphi(\omega)] \quad (\text{I, 62})$$

Частотные характеристики выражают зависимость параметров установившихся выходных колебаний от параметров входных колебаний при одинаковых частотах. Они отображают квазиустановившиеся процессы в системе и в полной мере определяют ее динамические свойства. Частотные характеристики системы или звена можно определить по их уравнениям динамики.

Пример 1-4. Найти аналитическое выражение АФХ апериодического звена, характеризуемого уравнением динамики (I, 27).

Гармонические колебания на входе этого звена (частота ω , амплитуда $A_{\text{вх}}$)

$$x_{\text{вх}} = A_{\text{вх}}e^{i\omega t} \quad (\text{I, 63})$$

вызовут на его выходе гармонические колебания с той же частотой ω , но с другой амплитудой $A_{\text{вых}}$ и со сдвигом по фазе φ

$$x_{\text{вых}} = A_{\text{вых}}e^{i\omega t}e^{i\varphi} \quad (\text{I, 64})$$

Продифференцируем это выражение по t

$$\frac{dx_{\text{вых}}}{dt} = (i\omega)A_{\text{вых}}e^{i\omega t}e^{i\varphi} \quad (\text{I, 65})$$

и подставим значения $x_{\text{вх}}$, $x_{\text{вых}}$ и $dx_{\text{вых}}/dt$ из равенств (I,63) — (I,65). в уравнение (1,27). Получим

$$T = (i\omega)A_{\text{вых}}e^{i\omega t}e^{i\varphi} + A_{\text{вх}}e^{i\omega t}e^{i\varphi} = kA_{\text{вх}}e^{i\omega t}$$

Сократим все слагаемые в последнем уравнении на $\exp(i\omega t)$ и вынесем общий множитель в его левой части за скобки

$$[T(i\omega + 1)]A_{\text{вх}}e^{i\varphi} = kA_{\text{вх}} \quad (\text{I, 66})$$

По определению модуль вектора АФХ звена при частоте ω равен отношению $A_{\text{вх}}/A_{\text{вх}}$, а аргумент — φ . Учитывая это, из уравнения (I,66) получим искомое аналитическое выражение АФХ апериодического звена $W(i\omega)$:

$$W(i\omega) = \frac{A_{\text{вх}}}{A_{\text{вх}}}e^{i\varphi} = \frac{k}{T(i\omega+1)} \quad (\text{I, 67})$$

Сравнивая полученное выражение с выражением передаточной функции этого звена (1,39), отметим, что они совпадают за исключением множителей p и $i\omega$. Этот вывод справедлив для всех звеньев и систем.

Следовательно, аналитическое выражение АФХ системы n -го порядка, уравнение движения которой описывается равенством (I,6) а передаточная функция — зависимостью (1,38), может быть получено путем замены комплексной величины p в уравнении (1,38) на мнимую величину $i\omega$

$$W(i\omega) = \frac{b_0(i\omega)^m + b_1(i\omega)^{m-1} + \dots + b_{m-1}(i\omega) + b_m}{a_0(i\omega)^n + a_1(i\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1}(i\omega) + a_n} = \frac{K(i\omega)}{D(i\omega)} \quad (\text{I, 68})$$

Аналитические выражения остальных частотных характеристик звена или системы находят по выражению АФХ. Для этого сначала освобождаются от мнимости в знаменателе АФХ и разделяют полученную комплексную величину на вещественную и мнимую части, т. е. находят соответственно ВЧХ и МЧХ. Затем по равенствам (I,58) и (I,59) определяют АЧХ и ФЧХ.

Пример 1-5. Найти АЧХ и ФЧХ звена, характеризуемого уравнением динамики (I,27).

Для нахождения этих частотных характеристик освободимся от мнимости в знаменателе выражения (I,67) и представим АФХ звена через вещественную и мнимую части:

$$W(i\omega) = \frac{k}{T^2\omega^2 + 1} - i \frac{kT\omega}{T^2\omega^2 + 1}$$

Отсюда

$$U(\omega) = \frac{k}{T^2\omega^2 + 1} \quad (\text{I, 69})$$

$$V(\omega) = -\frac{kT\omega}{T^2\omega^2 + 1} \quad (\text{I, 70})$$

В данном случае при изменении ω от 0 до ∞ $U(\omega)$ принимает только положительные значения, а $V(\omega)$ — только отрицательные. Следовательно, АФХ этого звена располагается в IV квадранте комплексной плоскости.

АЧХ и АФХ рассматриваемого звена можно записать уравнениями

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{k^2 + k^2 T^2 \omega^2}}{T^2 \omega^2 + 1} = \frac{k}{\sqrt{T^2 \omega^2 + 1}} \quad (\text{I, 71})$$

$$\varphi(\omega) = \arctg(-T\omega) \quad (\text{I, 72})$$

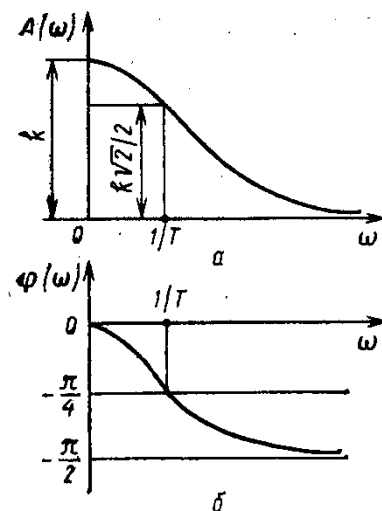


Рис. I-13. Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики аperiodического звена.

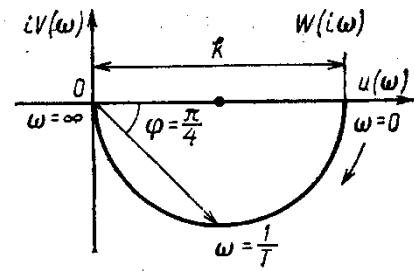


Рис. I-14. Амплитудно-фазовая характеристика аperiodического звена.

Зная $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$, запишем АФХ звена в показательной форме

$$W(i\omega) = \frac{k}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}} \cdot e^{i \arctg(-T\omega)} \quad (\text{I, 73})$$

Графики $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ и $W(i\omega)$ рассматриваемого звена приведены на рис. I-13, I-14. Укажем, что АФХ звена имеет вид полуокружности, расположенной в IV квадранте комплексной плоскости, с центром в точке с координатами $+k/2, i0$.

Нахождение численных значений постоянных коэффициентов уравнения (I,27) по частотным характеристикам выполняется так, как показано на рис. I-13 и I-14.

Частотные характеристики типовых динамических звеньев приведены также в табл. 1.4.

Если известны структурная схема системы и уравнения динамики всех ее звеньев, то для определения АФХ системы обычно находят аналитические выражения передаточных функций всех звеньев системы и по ним, используя зависимости (I,41), (I,44), (I,48) и (I,49) и правила преобразования структурных схем, определяют передаточную функцию системы. Заменяя в полученном выражении комплексную переменную p на $i\omega$, находят АФХ системы.

Логарифмические частотные характеристики. Такие характеристики также находят применение в расчетах АСР. Зависимость $\lg A(\omega)$, построенную в логарифмическом масштабе частот по оси абсцисс, называют логарифмической амплитудно-частотной характеристикой (ЛАЧХ). При этом по оси ординат обычно откладывают не величину $\lg A(\omega)$, а пропорциональную ей величину $L(\omega)$, выраженную в децибелах. Соответствие между $A(\omega)$ в натуральных единицах и $L(\omega)$ в децибелах определяется равенством

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) \quad (\text{I, 74})$$

Зависимость $\varphi(\omega)$, построенную в логарифмическом масштабе частот по оси абсцисс, называют логарифмической фазо-частотной характеристикой (ЛФЧХ). Фазовый угол по оси ординат откладывают в градусах или радианах.

При построении логарифмических характеристик частоты откладывают в декадах. Декадой называют интервал изменения частоты в 10 раз.

Логарифмические частотные характеристики на больших участках изменения со без большой погрешности можно заменить прямыми. Всю же характеристику можно аппроксимировать ломаной кривой, состоящей из нескольких прямолинейных отрезков (асимптот). Асимптотическую ЛАЧХ обозначают через $L_a(\omega)$, а асимптотическую ЛФЧХ — через $\varphi_a(\omega)$. Для построения асимптотических логарифмических характеристик достаточно определить наклоны прямолинейных отрезков и координаты точек их сопряжения. Аппроксимация логарифмических частотных характеристик прямыми значительно облегчает их построение и поэтому именно они обычно используются в инженерной практике для расчета систем.

Пример 1-6. Аппроксимировать ЛАЧХ аналитическое выражение которой имеет вид

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{k}{\sqrt{T^2 \omega^2 + 1}} \quad (\text{I, 75})$$

Эта характеристика аппроксимируется двумя асимптотами:

$$\text{при } \omega_1 \ll \frac{1}{T} \quad L_a(\omega_1) = 20 \lg k \quad (\text{I, 76})$$

$$\text{при } \omega_2 \gg \frac{1}{T} \quad L_a(\omega_2) = 20 \lg k - 20 \lg T \omega_2 \quad (\text{I, 77})$$

Первая из этих асимптот представляет собой горизонтальную прямую с ординатой, не зависящей от частоты, равной $20 \lg k$, а вторая — прямую с отрицательным наклоном. Для нахождения наклона, асимптоты $L_a(\omega_2)$ найдем ее значение при частоте, равной $10\omega_2$ (в ДБ)

$$L_a(10\omega_2) = 20 \lg k - 20 \lg(T10\omega_2)$$

или

$$L_a(10\omega_2) = 20 \lg k - 20 \lg T \omega_2 - 20$$

Отсюда наклон асимптоты $L_a(\omega_2)$ равен

$$\frac{\Delta L_a(\omega_2)}{1 \text{ декада}} = -20 \text{ дБ/декада} \quad (\text{I, 78})$$

При частоте, $\omega = 1/T$ ординаты асимптот $L_a(\omega_1)$ и $L_a(\omega_2)$ имеют одинаковое значение, равное $20 \lg k$, и асимптоты сопрягаются. :

Наибольшая погрешность аппроксимации (в дБ), наблюдаемая при $\omega = 1/T$, равна:

$$\delta L(\omega) = L_a\left(\frac{1}{T}\right) - L\left(\frac{1}{T}\right) = 20 \lg k - 20 \lg k + 20 \lg \sqrt{2} \approx 3 \quad (\text{I, 79})$$

Графики рассмотренных действительной $L(\omega)$ и асимптотической $L_a(\omega)$ характеристик даны на рис. I-15.

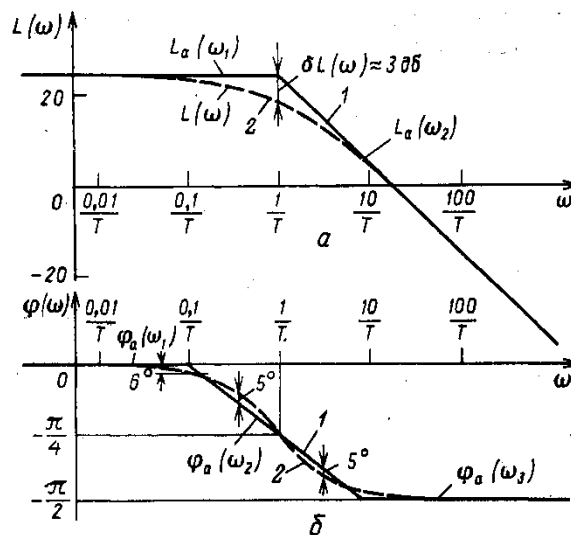


Рис. I-15. Логарифмические амплитудно-частотные (а) и фазо-частотные (б) характеристики аperiodического звена:
1 — асимптотические; 2 — действительные.

Пример 1-7. Построить асимптотическую характеристику звена, ЛФЧХ которого определяется равенством

$$\varphi(\omega) = -\text{arctg } T\omega \quad (\text{I, 80})$$

Рассматриваемую характеристику можно заменить тремя отрезками прямых: при значениях $\omega_1 \ll 0,1/T$ — горизонтальной прямой, совпадающей с осью абсцисс

$$\varphi_a(\omega_1) = 0 \quad (\text{I, 81})$$

при $\omega_3 \gg 10/T$ — также горизонтальной прямой, описываемой равенством

$$\varphi_a(\omega_3) = -\pi/2 \quad (\text{I, 82})$$

а в интервале частот $0,1/T < \omega_2 < 10/T$ — наклонной прямой/уравнение которой имеет вид:

$$\varphi_a(\omega_2) = -\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{4} \lg T\omega_2 = -\frac{\pi}{4} (1 + \lg T\omega_3) \quad (\text{I, 83})$$

Эта прямая проходит через точку с координатами $[\omega=1/T, \varphi_a(\omega)=-\pi/4]$ и имеет наклон — $-\pi/4$ на одну декаду. При такой аппроксимации погрешность не превышает 6° .

Графики характеристик $\varphi(\omega)$ и $\varphi_a(\omega)$ также приведены на рис. I-15.

Асимптотические логарифмические частотные характеристики системы находятся довольно просто при последовательном соединении входящих в нее звеньев. Для этого

на одно поле чертежа наносят характеристики отдельных звеньев, а затем в соответствии с равенствами

$$L(\omega) = \sum_{k=1}^n L_k(\omega) \quad (\text{I, 84})$$

$$\varphi(\omega) = \sum_{k=1}^n \varphi_k(\omega) \quad (\text{I, 85})$$

определяют значения их ординат при сопрягающих частотах и соединяют полученные точки отрезками прямых.

По временным характеристикам, передаточным функциям, характеристическим уравнениям или частотным характеристикам можно определить динамические свойства технологических объектов, регуляторов и других элементов, а также АСР.

ГЛАВА-II

ОБЪЕКТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

1. Виды объектов химической технологии, их математическое описание

Аппарат, система аппаратов, машина или другое устройство, в котором одна или несколько химико-технологических величин, характеризующих его состояние, поддерживаются автоматическими регуляторами на заданном значении или изменяются по определенному закону, называется объектом химической технологии. В химической промышленности объектами являются реакторы, абсорберы, экстракторы, ректификационные колонны, теплообменники, насосы, компрессоры и другие аппараты технологических установок, а также участки трубопроводов.

Являясь неотъемлемой частью АСУ или АСР, каждый объект представляет собой динамическую систему со своими входными и выходными величинами. К входным величинам объектов относят регулирующие воздействия x (потoki жидкостей, газов или сыпучих твердых веществ и тепловые потоки), которые с помощью исполнительных устройств можно изменять, а также разнообразные возмущающие воздействия z (изменение параметров исходного сырья и энергетических агентов, состояния технологической аппаратуры, атмосферных условий, и др.).

Одним из существенных возмущений является изменение нагрузки объекта. Под нагрузкой объекта (понимают количество вещества (или тепла), которое проходит через объект в единицу времени. Так, нагрузкой резервуара является расход

протекающей через него жидкости, нагрузкой теплообменника — количество тепла, передаваемого в единицу времени от более нагретого вещества к более холодному. Величина нагрузки определяет размеры аппарата, а также типоразмеры первичных преобразователей и исполнительных устройств АСР. Выходные величины объектов — регулируемые величины y — характеризуют протекание химико-технологического процесса в объекте. Такими величинами могут быть (температура, давление и расход жидкости, газа или пара, уровень жидкости или сыпучего материала, содержание одного из компонентов в газовой смеси, концентрация растворов, рН водного раствора, плотность и вязкость жидкостей, влажность газов или сыпучих материалов и др.). Текущие значения регулируемых величин определяют протекание процесса в объекте в данный момент времени. Под влиянием возмущающих и регулирующих воздействий регулируемые величины изменяются во времени. Число входных величин объекта обычно превышает число выходных.

Математические модели. Процессы, протекающие в объектах могут быть формализованы, т.е. с достаточной степенью точности описаны с помощью математических зависимостей. Совокупность математических уравнений, отражающих взаимосвязь выходных и входных величин объекта, дополненная ограничениями, накладываемыми на эти величины условиями их физической реализации и безопасной эксплуатации, представляют собой математическую модель (математическое описание) объекта.

Математическая модель должна отражать особенности объекта, существенные с точки зрения его управления, быть адекватной моделируемому объекту (достаточно точно отражать его свойства количественно и качественно), а также быть по возможности более простой.

Математическая формализация объекта позволяет использовать для его исследования, а также для решения задачи управления этим объектом методы математического моделирования, которые обычно реализуют с применением средств вычислительной техники.

В соответствии с физической сущностью процессов, протекающих в объекте, математические модели делят на детерминированные и стохастические. В детерминированных моделях значения выходных величин однозначно определяются значениями входных величин. Для их решения используют методы классического анализа и численные методы. Детерминированные модели с успехом используют для исследования относительно простых систем. В стохастических моделях отсутствует четкое соответствие между значениями входных и выходных величин, взаимозависимость между ними описывается случайными функциями времени. Для их решения используют аппарат теории вероятности и математической статистики.

Стохастические модели применяют при исследовании больших химико-технологических систем.

Поведение объекта в установившемся состоянии описывается статической моделью, а в неравновесном — динамической.

Статическая модель содержит уравнение связи между входными и выходными величинами объекта в равновесном состоянии

$$y = f(x, z) \quad (\text{II}, 1)$$

Динамическая модель связывает входные и выходные величины объекта в неравновесных состояниях

$$y = f(x, z, t) \quad (\text{II}, 2)$$

а также ограничения, накладываемые на отдельные величины, например:

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \quad x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (\text{II}, 3)$$

Классификация объектов проводится по ряду признаков. Различают одномерные и многомерные объекты. *Одномерные объекты* имеют одну выходную величину и описываются одним уравнением статики и одним уравнением динамики. Примером одномерного объекта может служить резервуар для жидкости (рис. II-1), входными величинами которого являются приход F_{np} и расход F_p жидкости, а выходной величиной — уровень жидкости L . Увеличение (уменьшение) F_{np} или F_p вызывает изменение уровня L . Запишем уравнение статики этого объекта $L = f(F_{np}, F_p)$ и уравнение его динамики $L = f(F_{np}, F_p, t)$.

Многомерные объекты содержат по две, три и более выходных величины. Число уравнений (II,1) и (II,3) должно соответствовать числу выходных величин. Наиболее простыми из многомерных объектов являются двухмерные объекты. Их выходные величины могут влиять или не влиять одна на другую.

В многомерных объектах с независимыми выходными величинами изменение любой из входных величин приводит к изменению только своей выходной величины. Такие объекты

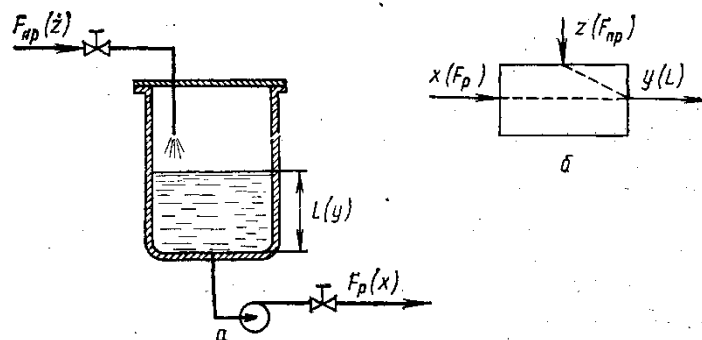


Рис II-1. Схемы резервуара для жидкости (а), и его динамических каналов (б).

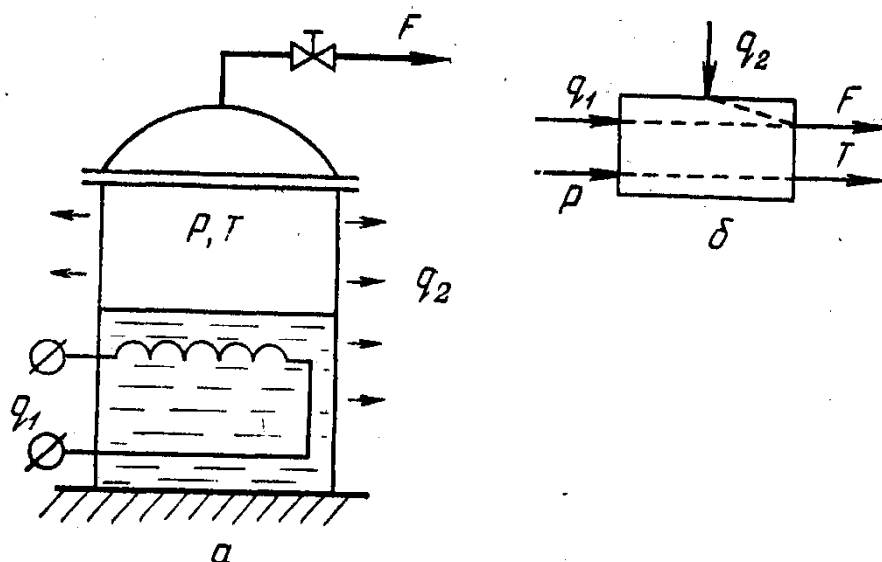


Рис. II-2. Схемы испарителя однокомпонентной жидкости (а) и его динамических каналов (б).

можно разбить на несколько одномерных объектов и рассматривать их независимо один от другого. Например, аппарат, в котором осуществляется испарение однокомпонентной жидкости при непрерывном отборе паровой фазы (рис. II-2), можно при некоторой идеализации отнести к двумерным объектам q независимыми величинами. Тепловой поток, проходящий через аппарат, представляющий собой разность между притоками тепла q_1 и его потерями в окружающую среду q_2 , определяет расход пара F , т. е. изменение скорости нагревания изменяет лишь скорость образования пара. Давление же в системе P определяет температуру T процесса испарения. Этот объект описывается двумя уравнениями статики

$$F = f(q_1, q_2) \quad T = f(P)$$

и двумя уравнениями динамики

$$F = f(q_1, q_2, t) \quad T = f(P, t)$$

В многомерных объектах с взаимозависимыми выходными величинами изменение входных величин приводит к: одновременному изменению нескольких выходных величин, что объясняется наличием в таких объектах каналов перекрестных связей.

Примером двумерного объекта с перекрестными связями является непрерывно действующий экзотермический реактор идеального перемешивания. Схемы реактора и его динамических каналов приведены на рис. II-3. Реактор имеет пять входных величин (концентрация Q_n и температура T_n реагентов на входе в реактор, расход реагентов в реактор F , а также тепло, отводимое из реактора системой охлаждения и определяемое расходом хладагента F_c и его температурой T_c). Выходными величинами являются концентрация продуктов реакций Q и температура в реакторе T .

Для стабилизации температуры T в реакторе изменяют расход хладагента F_c , а для обеспечения постоянства состава

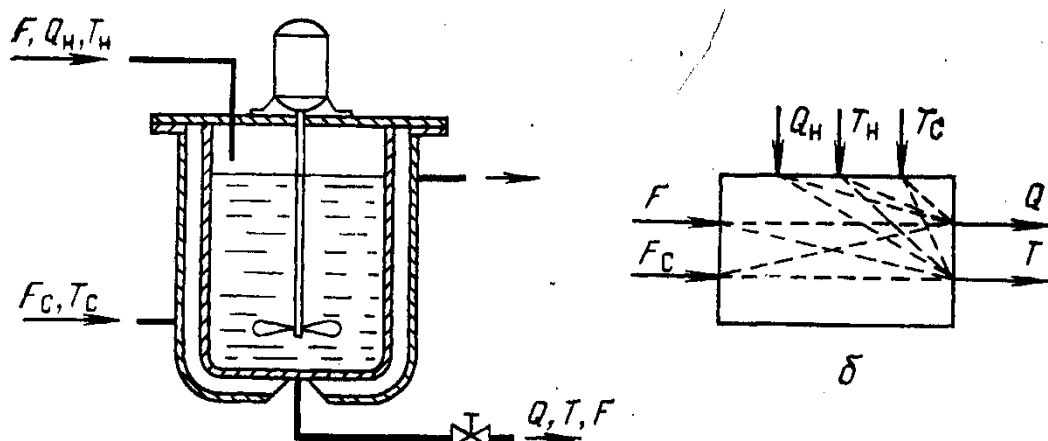


Рис. II-3. Схемы химического реактора идеального перемешивания (а) и его динамических каналов (б).

продуктов реакции Q — расход F реагентов, подаваемых в реактор. При этом изменение расхода хладагента F_c вызывает также изменение состава продуктов реакции Q , а колебание расхода исходных реагентов F приводит к изменению температуры T реакционной массы в реакторе. Кроме этого, выходные величины реактора (Q и T) зависят от концентрации Q_n и температуры T_n входного продукта, а также от температуры хладагента T_c . Помимо прямых рассматриваемый объект имеет и перекрестные каналы прохождения сигналов. Выходные величины такого реактора находят из уравнений динамики

$$Q = f_1(F, F_c, Q_n, T_n, T_c, t) \quad T = f_2(F_c, F, Q_n, T_n, T_c, t)$$

Таким образом, обе выходные величины реактора испытывают влияние всех его входных величин. Прохождение сигналов по каждому каналу может быть выражено своим уравнением динамики или своей передаточной функцией. Объекты могут обладать сосредоточенными и распределенными параметрами.

Объекты с сосредоточенными параметрами. К ним относятся объекты, регулируемые величины которых имеют одно числовое значение в данный момент времени (уровень жидкости в аппарате, давление газа в газгольдере и др.). (Типичными представителями объектов с сосредоточенными параметрами являются резервуар для жидкостей, испаритель, химический реактор.

Динамика объектов с сосредоточенными параметрами описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Эти уравнения должны быть дополнены начальными условиями.

Объекты с распределенными параметрами. К ним относятся объекты, регулируемые величины которых (температура жидкости по длине теплообменника, концентрации компонентов по высоте ректификационной колонны и др.) имеют разные числовые значения в различных точках объекта в данный момент времени. Примерами объектов с распределенными параметрами могут служить: аппараты типа «труба в трубе», в которых

осуществляется теплообмен между жидкостями, массообменные аппараты колонного типа (ректификационные колонны, экстракторы, абсорберы, десорберы), барабанные сушилки для сыпучих материалов, трубчатые реакторы для превращения вещества и многие другие.

Динамика объектов с распределенными параметрами описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, дополненными начальными и граничными условиями. Решение уравнений в частных производных более сложно, чем решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Поэтому при составлении математического описания объектов с распределенными параметрами их часто разбивают на ряд последовательно соединенных элементов с сосредоточенными параметрами, каждый из которых описывается обыкновенным дифференциальным уравнением. Точность такого описания тем выше, чем на большее число элементов был разбит исследуемый объект. Поэтому далее будут рассмотрены объекты с сосредоточенными параметрами.

2. Свойства объектов и их переходные процессы

Вид переходного процесса в объекте зависит от величины и формы наносимых на него регулирующих и возмущающих воздействий, а также от его динамических свойств.

Свойства объекта необходимо знать при составлении схемы автоматизации, выборе закона работы регулятора и определении оптимальных значений его настроечных параметров. Правильный учет свойств объектов позволяет создавать АСР, имеющие значительно более высокие показатели качества переходного процесса; недооценка же свойств объектов может привести к тому, что даже сложные схемы регулирования не смогут обеспечить требуемого качества переходного процесса. Основными свойствами объектов регулирования являются самовыравнивание (саморегулирование), емкость и запаздывание.

Самовыравнивание объекта характеризует его устойчивость. Самовыравниванием называют свойство устойчивого объекта самостоятельно устанавливаться в равновесное состояние после изменения своей входной величины. В объектах с самовыравниванием ступенчатое изменение входной величины приводит к изменению выходной величины со скоростью, постепенно уменьшающейся до нуля, что связано с наличием внутренней отрицательной обратной связи. Количественно эта характеристика определяется степенью самовыравнивания ρ , под которой понимают отношение изменения выходной величины объекта (x, z) к изменению входной величины по достижении объектом равновесного состояния y_∞

$$\rho = \frac{x}{y_\infty} \quad \text{или} \quad \rho = \frac{z}{y_\infty}$$

Чем больше степень самовыравнивания, тем меньше отклонение выходной величины от первоначального положения.

Емкость объекта является свойством, присущим всем динамическим объектам. Она характеризует их инерционность — степень влияния входной величины на скорость изменения выходной. Даже ступенчатое изменение входной величины объекта приводит к изменению выходной величины с конечной скоростью. Под емкостью понимают такое изменение входной величины, которое приводит к изменению его выходной величины на единицу за единичный отрезок времени

$$c = \frac{x}{dy/dt}$$

Чем больше емкость, тем меньше скорость изменения выходной величины объекта, и наоборот.

Запаздывание объекта выражается в том, что его выходная величина начинает изменяться не сразу после нанесения возмущения, а только через некоторый промежуток времени t , называемый временем запаздывания. Все реальные объекты обладают запаздыванием, так как изменение потоков вещества или тепла распространяется в объектах с конечной скоростью и требуется время для прохождения сигнала от места нанесения возмущения до места, где фиксируется изменение выходной величины. Обозначив это расстояние через l , а скорость прохождения сигнала через s , выразим время запаздывания следующим образом:

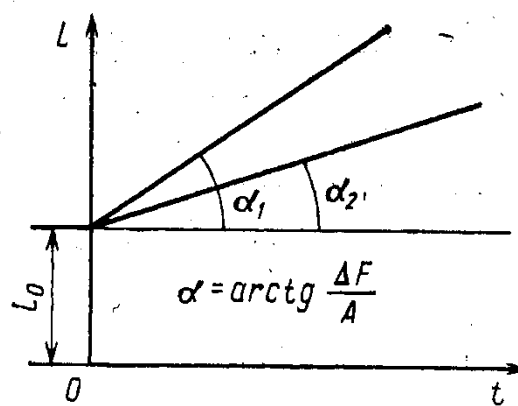
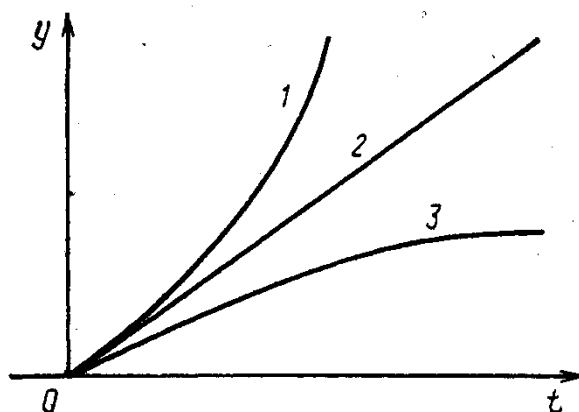
$$\tau = l/s$$

Влияние свойств объекта на вид его переходного процесса будем изучать на примерах одномерных объектов с сосредоточенными параметрами.

В зависимости от вида дифференциального уравнения динамики реального объекта химической технологии целесообразно различать объекты первого, второго и высокого порядков.

По способности восстанавливать равновесное состояние при конечном изменении входных величин можно подразделять объекты на нейтральные, устойчивые и неустойчивые (рис. II-4).

Объекты 1-го порядка широко распространены в химической промышленности. К ним относятся сборники жидкости, бункеры для сыпучих материалов, газовые аккумуляторы, жидкостные смесители, теплообменники смешения и т. д. Во всех этих аппаратах количество вещества или тепла заключено в одном резервуаре. Такие объекты обладают способностью аккумулировать (накапливать) проходящие через них вещество или тепло в переходном режиме. Это выражается в том, что рассогласование потоков на входе и выходе при изменении, например, нагрузки вызывает изменение количества вещества или



тепла в объекте, а следовательно, и выходной величины объекта. При этом скорость изменения выходной величины объекта зависит от аккумулирующей способности или инерционных свойств объекта.

Нейтральные объекты 1-го порядка. В нейтральных объектах входные величины влияют на выходные, а последние не влияют на входные величины, т. е. внутренняя обратная связь отсутствует.

В качестве примера такого объекта рассмотрим резервуар (см. рис. II-1), из которого насосом откачивается жидкость, причем производительность F_p постоянна.

Для нахождения зависимости уровня жидкости в аппарате L от входных величин F_{np} и F_p (в $\text{м}^3/\text{с}$) составим уравнение материального баланса аппарата:

$$F_{np} dt = dV + F_p dt \quad (\text{II}, 4)$$

где V — объем жидкости в аппарате, м^3 ; t — время, с. Отсюда скорость изменения объема жидкости в аппарате:

$$\frac{dV}{dt} = F_{np} - F_p \quad (\text{II}, 5)$$

Скорость изменения уровня жидкости L , если площадь горизонтального сечения аппарата A (в м^2) неизменна по высоте

$$\frac{dL}{dt} = \frac{1}{A} (F_{np} - F_p) \quad (\text{II}, 6)$$

Таким образом, скорость изменения уровня в резервуаре пропорциональна разности потоков жидкости на входе и выходе. Уровень жидкости принимает постоянные значения во времени (скорость $dL/dt=0$) только при отсутствии рассогласования потоков F_{np} и F_p .

Проинтегрируем уравнение (II,6) в пределах от 0 до t

$$L = \frac{1}{A} \int_0^t (F_{np} - F_p) dt + L_0 \quad (\text{II}, 7)$$

Следовательно, выходная величина объекта пропорциональна интегралу от изменения его входных величин.

При ступенчатом изменении нагрузки объекта на величину ΔF уровень жидкости L изменяется по зависимости (рис, II-5):

$$L = \frac{\Delta F}{A} t + L_0 \quad (\text{II, 8})$$

Как следует из уравнения (II,8), скорость изменения выходной величины при ступенчатом возмущении ΔF постоянна и равна

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\Delta F}{A} \quad (\text{II, 9})$$

При расчетах систем автоматизации уравнение динамики объекта представляют в относительных величинах. Предполагая, что F_{np} является возмущением, а F_p — регулирующим воздействием (см. рис. II-1), имеем

$$y = \frac{\Delta L}{L_0} \quad x = \frac{\Delta F}{F_0} \quad z = \frac{\Delta F_{np}}{F_0} \quad (\text{II, 10})$$

где L_0 и F_0 — значения соответствующих величин при равновесном состоянии объекта.

Записав уравнение (II,6) в приращениях и введя относительные величины, получим уравнение динамики:

$$\frac{AL_0}{F_0} \cdot \frac{dy}{dt} = z - y \quad (\text{II, 11})$$

Из уравнения (II,11) видно, что отношение AL_0/F_0 имеет размерность времени. Его называют временем разгона объекта и обозначают через T_ε . Под этим термином понимают время, в течение которого выходная величина объекта y , изменяясь с постоянной скоростью, достигает значения входной величины z . Время разгона T_ε прямо пропорционально емкости объекта и характеризует его инерционные свойства.

Заменяя коэффициент в левой части уравнения (II,11) через T_ε , получим уравнение динамики нейтрального объекта первого порядка в общем виде

$$T_\varepsilon \frac{dy}{dt} = z - y \quad (\text{II, 12})$$

Интегрируя уравнение (II,12), найдем

$$y = \frac{1}{T_\varepsilon} \int_0^t (z - x) dt \quad (\text{II, 13})$$

В нашем случае $x=0$. Величину, обратную T_ε , часто называют скоростью разгона объекта ε , под которой понимают скорость изменения выходной величины y при предварительном ступенчатом изменении входной величины z , равном единице.

Действительно, при единичном ступенчатом возмущении $z \rightarrow x=l(t)$ изменение выходной величины y подчиняется зависимости:

$$h(t) = y = \frac{1}{T_\varepsilon} t \quad (\text{II, 14})$$

Передаточная функция нейтрального объекта первого порядка

$$W(p) = \frac{1}{T_\varepsilon p} \quad (\text{II, 15})$$

В динамическом отношении такой объект представляет собой интегрирующее звено.

Нейтральным объектам первого порядка присущи только емкостные (инерционные) свойства, что выражается, например при регулировании уровня L , степенью влияния величины $F_{np} - F_p$ на скорость dL/dt . Это влияние зависит от площади поперечного сечения аппарата. При большем значении A скорость изменения уровня меньше и наоборот (см. рис. II-5).

Для рассмотренного выше аппарата емкость равна

$$C = \frac{F_{np} - F_p}{dL/dt} \quad (\text{II, 16})$$

Из сравнения уравнений (II,6) и (II,16) следует, что емкость резервуара численно равна площади его горизонтального сечения. Единицей измерения емкости в данном случае является м^2 .

Емкость объектов зависит от протекающих в них процессов. Так емкость тепловых объектов, в которых осуществляется теплообмен при регулировании в них температуры, находят по изменению теплового потока Δq , Вт, вызывающего приращение температуры T на 1°C в течение 1 ч:

$$C = \frac{\Delta q}{dT/dt} \quad (\text{II, 17})$$

Емкость аппарата зависит от теплоемкости c_t , находящегося в нем продукта. Единицей измерения емкости теплового объекта является $\text{Дж}/^\circ\text{C}$.

Устойчивые объекты 1-го порядка. Если жидкость из рассмотренного выше резервуара не откачивать насосом, а отводить самотеком по трубопроводу, на котором имеется дополнительное гидравлическое сопротивление, например вентиль, то при рассогласовании потоков на входе и выходе регулируемая величина (уровень) будет самостоятельно устанавливаться в новом равновесном состоянии.

При ступенчатом увеличении притока жидкости F_{np} а величину ΔF (рис. II-6) уровень L в аппарате в первый момент начнет изменяться, как и в случае нейтрального объекта (см. пунктир), со скоростью определяемой равенством (II,9). Но при повышении уровня возрастает гидростатический напор, что

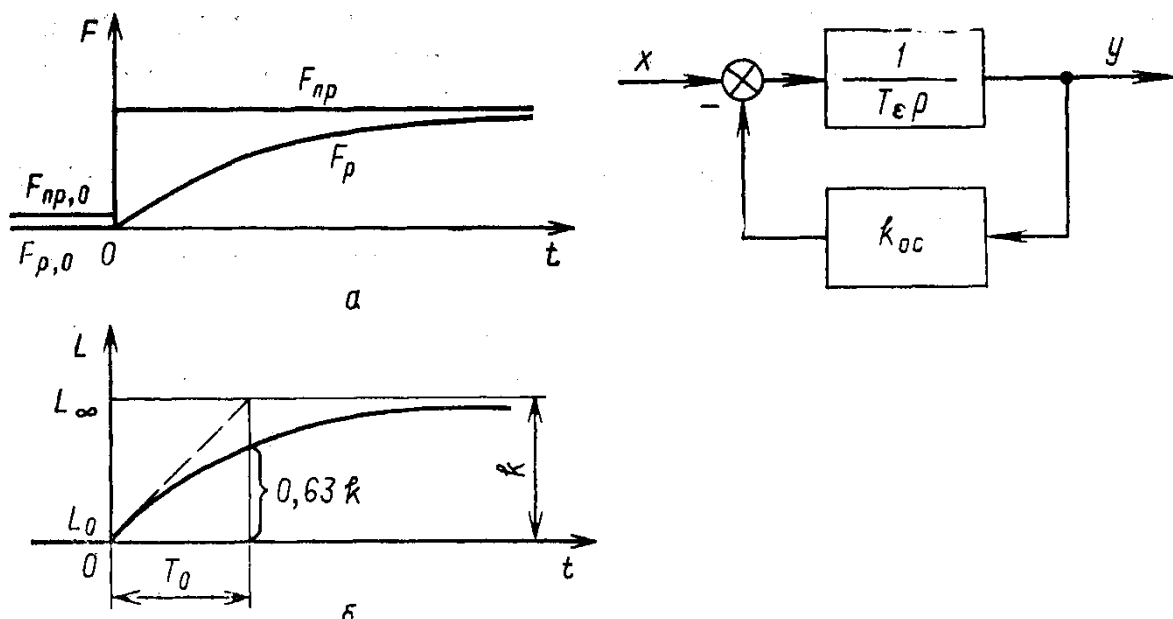


Рис. II-7. Структурная схема устойчивого объекта 1-го порядка.

в свою очередь увеличит расход жидкости из аппарата F_p ; его зависимость от уровня L :

$$F_p = \alpha A \sqrt{2gL} \quad (\text{II}, 18)$$

где α — коэффициент расхода вентиля; A — площадь его проходного сечения; g — ускорение свободного падения.

С увеличением F_p величина возмущения $\Delta F = F_{np} - F_p$, а, следовательно, и скорость изменения уровня уменьшаются. Со временем расход жидкости постепенно достигнет текущего значения притока, повышение ее уровня, изменяющегося по экспоненте, прекратится и наступит новое равновесное состояние объекта, но при более высоком значении уровня L_{∞} . Аналогичным образом при ступенчатом уменьшении F_{np} уровень L начнет понижаться, что обусловит уменьшение расхода F_p , вследствие уменьшения гидростатического напора. Со временем между расходом и притоком жидкости восстанавливается равенство, но при более низком уровне.

Устойчивость объектов объясняется наличием в них отрицательной обратной связи. В частности, в рассматриваемом объекте обратная связь определяется равенством (II,18).

Для нахождения передаточной функции звена обратной связи линеаризуем зависимость (II,18), разлагая ее в ряд Тейлора в окрестности точки с координатами (L_0, F_{p0})

$$F_p = F_{p0} \alpha A \sqrt{2g} \cdot \frac{1}{2\sqrt{L_0}} (L - L_0)$$

Откуда

$$\Delta F_p = \frac{\alpha A \sqrt{2gL_0}}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$$

Учитывая равенства (II,10) и (II,18), окончательно получим:

$$x = k_{oc}y \quad (\text{II, 19})$$

где $k_{oc} = 1/2$.

Таким образом, в данном случае обратная связь соответствует усиленному звену с коэффициентом усиления $1/2$.

Структурная схема устойчивого объекта 1-го порядка приведена на рис. II-7. Интегрирующее звено с передаточной функцией $1/T_\varepsilon p$ охватывается звеном отрицательной обратной связи с передаточной функцией k_{oc} . Передаточная функция такого объекта имеет вид

$$W(p) = \frac{\frac{1}{T_\varepsilon p}}{1 + \frac{1}{T_\varepsilon p} k_{oc}} = \frac{\frac{1}{k_{oc}}}{\frac{T_\varepsilon}{k_{oc}} p + 1} = \frac{k}{T_o p + 1} \quad (\text{II, 20})$$

где $k = 1/k_{oc}$ — коэффициент усиления объекта; $T_o = T_\varepsilon/k_{oc}$ — постоянная времени объекта, под которой понимают время, в течение которого выходная величина достигла бы своего нового установившегося значения, если бы она изменялась с постоянной скоростью, равной скорости ее изменения в начальный момент времени. При $t = T_o$ выходная величина составляет 63% нового установившегося значения. Постоянная времени объекта определяется как проекция на ось времени отрезка касательной к экспоненте, заключенного между точкой касания и точкой пересечения касательной с линией установившегося значения выходной величины (см. рис. II-6,б). Длина этой проекции одинакова для касательных, проведенных к любой точке экспоненты.

Постоянная времени объекта T_o определяет его динамические свойства. Чем она больше, тем медленнее протекает переходный процесс в объекте, и наоборот.

В соответствии с передаточной функцией (II,20) уравнение динамики устойчивого объекта первого порядка имеет вид

$$T_o \frac{dy}{dt} + y = kz \quad (\text{II, 21})$$

Переходная характеристика этого объекта аналогично выражению (I,28) будет равна

$$h(t) = y = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T_o}} \right) \quad (\text{II, 22})$$

Таким образом, рассматриваемый объект представляет собой апериодическое звено первого порядка, коэффициент усиления k которого равен величине, обратной коэффициенту усиления обратной связи, а постоянная времени T_o — отношению времени разгона интегрирующего звена к коэффициенту усиления обратной связи.

Таблица II.1. Основные характеристики объектов химической технологии по каналу $x \rightarrow y$

Объект	Уравнение динамики	Переходная характеристика $h(t)$
Нейтральный I-го порядка	$T_\varepsilon \frac{dy}{dt} = x$	Объекты без запаздывания $\frac{1}{T_\varepsilon} t$
Устойчивый I-го порядка	$T_0 \frac{dy}{dt} + y = kx$	$k(1 - e^{-\frac{t}{T_0}})$
Нейтральный 2-го порядка	$T_\varepsilon \left[T_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} \right] = x$	$\frac{1}{T_\varepsilon} \left[t - T_0 (1 - e^{-\frac{t}{T_0}}) \right]$
Устойчивый 2-го порядка	$T_1^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_2 \frac{dy}{dt} + y = kx$ $T_2 \geq 2T_1$	$k \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_4}} \right)$ $T_{3,4} = \frac{1}{2} (T_2 \pm \sqrt{T_2^2 - 4T_1^2}); T_3 \geq T_4$
Нейтральный I-го порядка	$T_\varepsilon \frac{dy(t)}{dt} = x(t - \tau)$	Объекты с запаздыванием 0 ($0 < t < \tau$) $\frac{t - \tau}{T_\varepsilon}$ ($t \geq \tau$)
Устойчивый I-го порядка	$T_0 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t - \tau)$	0 ($0 < t < \tau$) $k(t - \tau) - k e^{-\frac{t - \tau}{T_0}}$ ($t \geq \tau$)

График переходной характеристики	Передаточная функция $W(p)$	Структурная схема
	$\frac{1}{T_e p}$	
	$\frac{k}{T_0 p + 1}$	$k_{0c} = 1/k$; $T_e = T_0 \cdot k_{0c}$
	$\frac{1}{T_e p (T_0 p + 1)}$	
	$\frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} = \frac{k}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}$	
	$\frac{1}{T_e p} e^{-p\tau}$	
	$\frac{k}{T_0 p + 1} e^{-p\tau}$	$k_{0c} = 1/k$ $T_e = T_0 \cdot k_{0c}$

Объект	Уравнение динамики	Переходная характеристика
Нейтральный 2-го порядка	$T_E \left[T_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} \right] = x(t - \tau)$	$0 \quad (0 < t < \tau)$ $\frac{t - \tau}{T_E} - \frac{T_0}{T_E} (t - \tau) + \frac{T_0}{T_E} e^{-\frac{t - \tau}{T_0}} \quad (t \geq \tau)$
Устойчивый 2-го порядка	$T_1^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_2 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t - \tau)$ $T_2 \geq 2T_1$	$0 \quad (0 < t < \tau)$ $k(t - \tau) - \frac{kT_3}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t - \tau}{T_3}} +$ $+ \frac{kT_4}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t - \tau}{T_4}} \quad (t \geq \tau)$ $T_{3,4} = \frac{1}{2}(T_2 \pm \sqrt{T_2^2 - 4T_1^2}); T_3 \geq T_4$

Емкостные свойства устойчивых объектов 1-го порядка аналогичны свойствам нейтральных объектов 1-го порядка.

Для устойчивых объектов степень самовыравнивания $\rho > 0$, для нейтральных объектов $\rho = 0$. Переходные характеристики объектов 1-го порядка, обладающих различной степенью самовыравнивания, показаны на рис. II-8.

Основные характеристики объектов химической технологии 1-го порядка приведены в табл. II.1.

Объекты 2-го порядка. В таких объектах вещество или тепло заключено в двух объемах, разделенных сопротивлением. Примерами этих объектов являются теплообменник, в котором тепло передается через стенку от одной жидкости к другой; два сообщающихся между собой сосуда с жидкостью и т. д.

Рассмотрим систему, состоящую из двух аппаратов, соединенных трубопроводом, на котором установлен, клапан (рис. II-9). Входными величинами этого объекта являются потоки жидкости F_{np} и F_{py} а выходной — изменение уровня жидкости L

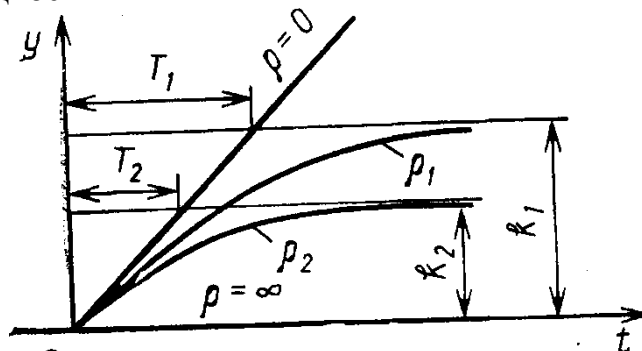


Рис. II-8. Переходные характеристики объектов 1-го порядка, обладающих различной степенью самовыравнивания.

График переходной характеристики	Передаточная функция	Структурная схема
	$\frac{1}{T_0 p (T_0 p + 1)} e^{-p\tau}$	
	$\frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} e^{-p\tau} = \frac{k}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)} e^{-p\tau}$	

в правом аппарате. При малом гидравлическом сопротивлении; вентиль на трубопроводе, соединяющем аппараты, уровни жидкости в аппаратах будут изменяться практически одинаково, и такую систему можно рассчитывать как объект 1-го порядка, объем которого равен сумме объемов обоих аппаратов. При существенном сопротивлении вентиля эту систему следует рассматривать как объект 2-го порядка.

Нейтральные объекты 2-го порядка. Если объект состоит из двух аппаратов, откуда жидкость отводится насосом с постоянной производительностью, то он нейтрален. Переходная характеристика нейтрального объекта 2-го порядка приведена на рис. II-10, а. Пунктиром показано изменение уровня y_1 в левом аппарате, а сплошной линией — уровня y в правом. При повышении уровня y_1 появляется гидростатический напор, под действием которого жидкость перетекает по соединительному трубопроводу. Скорость изменения уровня y в первый момент равна нулю, а затем постепенно повышается и достигает постоянного значения, равного dy_1/dt . Нейтральный объект 2-го порядка может быть представлен последовательно соединенными интегрирующим и аperiodическим звеньями 1-го порядка (рис. II-10,б).

Устойчивые объекты 2-го порядка. Если жидкость отводится из объекта самотеком через гидравлическое сопротивление, то объект устойчив. Его переходная характеристика имеет вид, приведенный на рис. II-11,а. Сначала выходная величина объекта изме

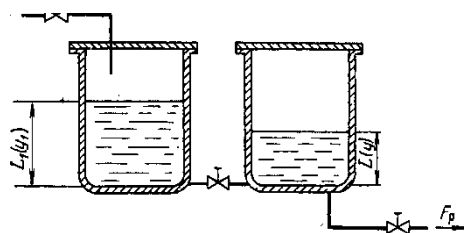


Рис. II-9. Схема резервуара для жидкости — объекта 2-го порядка. нается со все более увеличивающейся скоростью затем, вследствие уменьшения перепада давления на сое тельном вентиле, скорость изменения уровня у poste уменьшается до нуля. Такой объект может быть представлен двумя последовательно соединенными апериодическими функциями первого порядка (рис. II-11,б).

Основные характеристики объектов химической технологии имеющих 2-ой порядок, см. в табл. ПЛ.

Объекты высокого порядка. С повышением порядка объекта реагирует на возмущения все более замедленно. Изменение выходной величины в таких объектах при одинаковом значении степени самовыравнивания приведено на рис. II-12, а. Их поведение в динамике идентично поведению цепочки последовательно соединенных апериодических звеньев (рис. II-12,б).

Неустойчивые объекты. Если при нарушении равенства притока и расхода вещества или энергии через объект скорость изменения технологической величины постепенно увеличивается, то такой объект неустойчив. Примером неустойчивого объекта может служить химический реактор идеального перемешивания, в котором протекает экзотермическая реакция. Если тепло реакции будет превышать тепло, отводимое системой охлаждения, то температура в реакторе начнет повышаться, при этом возрастет степень превращения реагентов, что в свою очередь приведет к дальнейшему повышению температуры в реакторе, скорость изменения которой будет расти. Такое поведение реактора в переходном режиме объясняется наличием в нем внутренних положительных обратных связей.

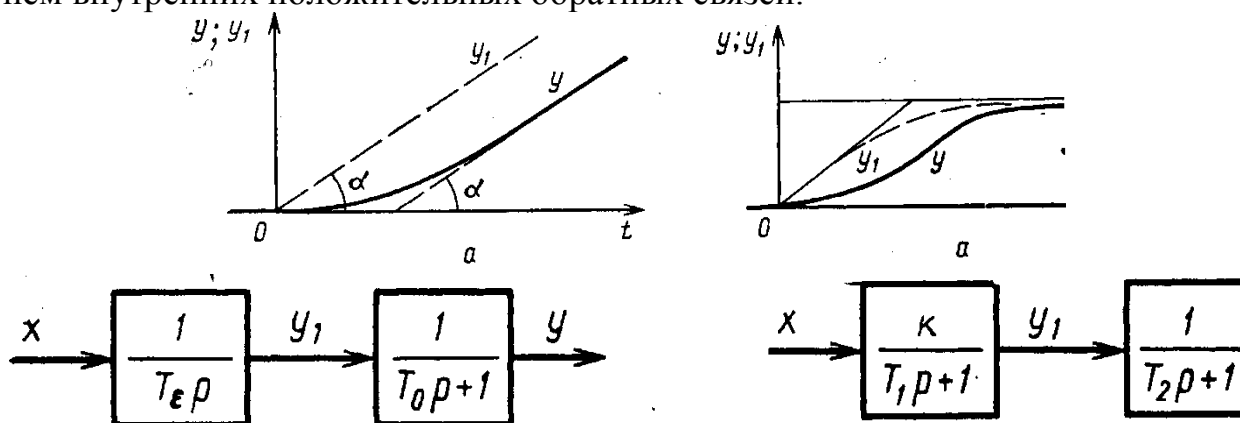


Рис. II-10. Переходная характеристика (а) и структурная схема (б) нейтрального объекта 2-го порядка.

Рис. II-11. Переходная характеристика (а) и структурная схема (б) устойчивого объекта 2-го порядка.

перемешивания, в котором протекает экзотермическая реакция. Если тепло реакции будет превышать тепло, отводимое системой охлаждения, то температура в реакторе начнет повышаться, при этом возрастет степень превращения реагентов, что в свою очередь приведет к дальнейшему повышению температуры в реакторе, скорость изменения которой будет расти. Такое поведение реактора в переходном режиме объясняется наличием в нем внутренних положительных обратных связей.

Объекты с запаздыванием. Ранее все объекты рассматривались при условии, что их выходная величина начинает изменяться сразу же после нанесения на объект возмущения. Однако в большинстве своем объекты химической технологии обладают запаздыванием. Оно достигает довольно больших значений (порядка нескольких десятков минут) в объектах, где протекают тепло- и массообменные процессы, и невелико (всего несколько секунд) в объектах, выходные величины которых представляют собой расход или давление жидкостей или газов.

Примером объекта, обладающего запаздыванием, является ленточный питатель сыпучего материала, схема которого приведена на рис. II-13. Материал из бункера 1 подается транспортером 3 в приемный аппарат 4. Входной величиной транспортера является поступление сыпучего материала на ленту, количество которого зависит от положения заслонки 2, а выходной — сброс материала в аппарат. Запаздывание ленточного транспортера τ определяется отношением длины ленты l к скорости ее движения. При расчетах запаздывание в объектах учитывают посредством последовательного введения звена запаздывания в соответствующий канал прохождения сигнала в объекте. Основные характеристики химико-технологических объектов с запаздыванием приведены в табл. II.1.

Переходные характеристики нейтрального (1) и устойчивого (2) объектов 1-го порядка с запаздыванием показаны на рис. II-14, а.

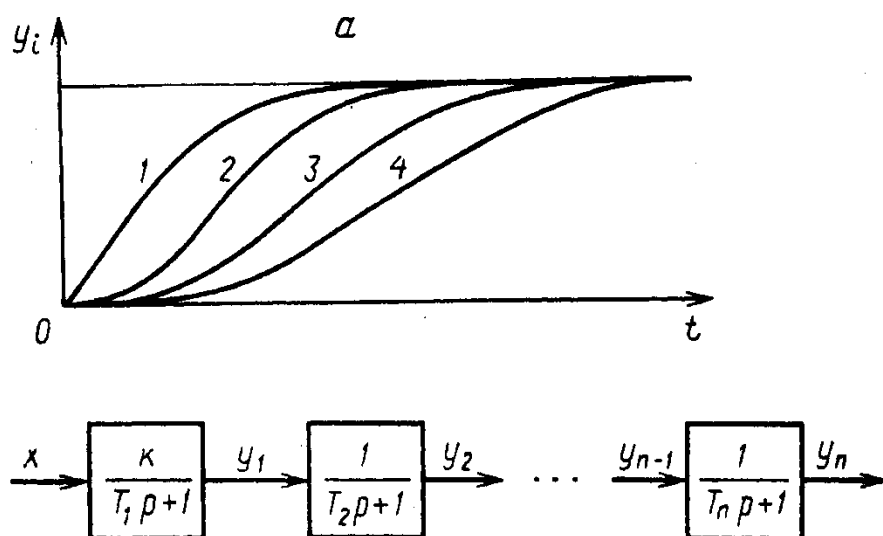


Рис. II-12. Переходные характеристики (а) и структурная схема (б) устойчивых объектов высокого порядка:

1—4 — характеристики объектов, соответствующие их порядкам.

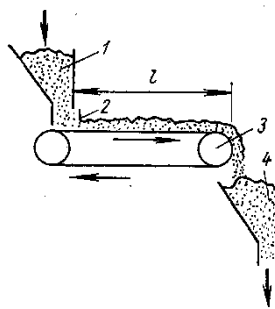


Рис. II-13. Ленточный питатель сыпучего материала:

1 — бункер; 2 — заслонка; 3 — транспортер; 4 — приемный аппарат.

От характеристик без запаздывания они отличаются наличием начального участка длительностью τ , в течение которого выходная величина объекта не изменяется. (Величину τ называют также транспортны запаздыванием). Определение времени запаздывания ясно из рисунка. Уравнения движения этих объектов соответственно имеют вид:

$$T_{\varepsilon} \frac{dy(t)}{dt} = x(t - \tau) \quad (\text{II, 24})$$

$$T_0 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t - \tau) \quad (\text{II, 25})$$

На рис. 11-14,6 даны переходные характеристики нейтрального (3) и устойчивого (4) объектов 2-го порядка с запаздыванием. При расчетах АСР переходные характеристики объектов 2-го порядка с запаздыванием иногда представляют в виде переходных характеристик объектов 1-го порядка с запаздыванием. При этом инерционные свойства объектов 2-го порядка частично отражают дополнительной величиной запаздывания, называемого переходным.

Структурные схемы нейтрального и устойчивого объектов 1-го и 2-го порядков с запаздыванием, а также передаточные функции составляющих их звеньев приведены на рис. II-15.

Влияние свойств объектов на их регулирование. Свойства объектов оказывают существенное влияние на выбор закона регулирования и качество переходного процесса АСР.

Емкость объектов влияет на выбор типа регулятора. Чем она меньше, т. е. чем больше скорость изменения выходной

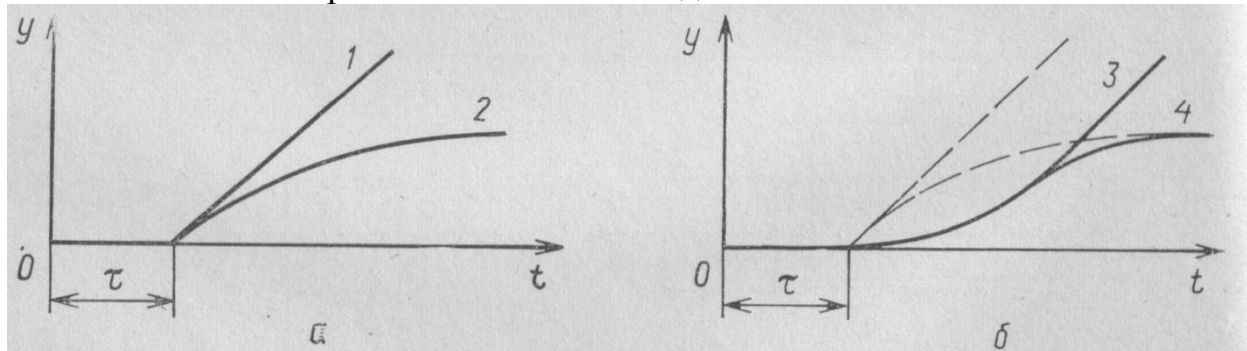


Рис. II-14. Переходные характеристики объектов с запаздыванием 1-го (а) и 2-го (б) порядков:

1, 3 — нейтральные объекты; 2, 4 — устойчивые объекты.

величины объекта при данном изменении нагрузки, тем большую степень воздействия на объект должен иметь регулятор.

Влияние самовыравнивания объекта аналогично действию автоматического регулятора. Так, нейтральные объекты, не обладающие самовыравниванием, самостоятельно не обеспечивают устойчивой работы и требуют обязательного применения автоматических регуляторов. Причем, не каждый регулятор может справиться с задачей управления такими объектами. Например, (как будет показано в гл. IV) применение интегрального регулятора на нейтральном объекте не позволяет получить устойчивой работы системы. Таким образом, отсутствие самовыравнивания в объектах усложняет задачу регулирования, а его наличие облегчает задачу поддержания выходной величины объекта на заданном значении. Чем выше степень самовыравнивания, тем более простыми методами можно обеспечить требуемое качество регулирования.

В некоторых объектах самовыравнивание так велико, что для поддержания постоянного значения выходной величины объекта вообще не требуется установки регулятора. Например, тарелка ректификационной колонны является объектом с бесконечно большой степенью самовыравнивания, если входной величиной является изменение притока на тарелку жидкости, поступающей с вышележащей тарелки, а выходной — изменение уровня жидкости на этой тарелке. Действительно, при любом возмущении на нижележащую тарелку по сливной трубе, имеющей достаточно большое сечение, перетечет точно такое количество жидкости, какое поступит на нее при неизменном уровне жидкости, определяемом высотой сливной трубы над тарелкой.

Наличие запаздывания в АСР усложняет задачу регулирования технологической величины в объекте. Поэтому необходимо стремиться к его уменьшению: устанавливать чувствительный элемент и исполнительное устройство системы как можно ближе к объекту регулирования, применять малоинерционные измерительные преобразователи и т.д.

Методы определения свойств объектов. Свойства объектов определяют анали

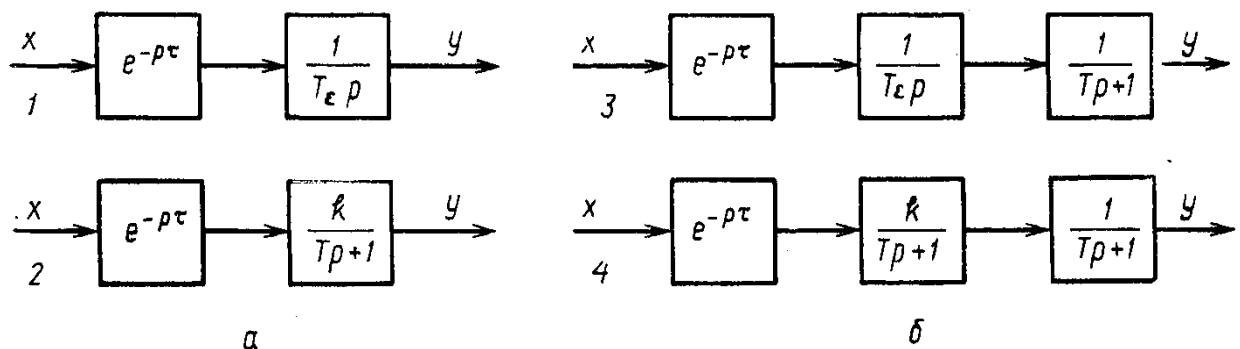


Рис. II-15. Структурные схемы объектов 1-го (а) и 2-го (б) порядков с запаздыванием:

1, 3 — нейтральные объекты; 2, 4 — устойчивые объекты.

тическим, экспериментальным и экспериментально-аналитическим методами.

Аналитический метод заключается в составлении математического описания объекта при котором находят уравнения статики и динамики на основе теоретического анализа физических и химических процессов, протекающих в исследуемом объекте, и с учетом конструкции аппаратуры и характеристик перерабатываемых веществ. При выводе этих уравнений используются фундаментальные законы сохранения вещества и энергии, а также кинетические закономерности процессов химических превращений, переноса тепла и массы.

Аналитический метод применяют при проектировании новых технологических объектов, физико-химические процессы которых достаточно хорошо изучены. Он позволяет прогнозировать работу объектов в статическом и динамическом режимах, однако сопряжен с трудностью решения и анализа составленных уравнений и требует проведения специальных исследований для определения численных значений коэффициентов этих уравнений. Кроме того, точность математического описания реальных объектов в большой степени зависит от введения упрощающих допущений.

Экспериментальный метод состоит в определении характеристик реального объекта путем постановки на нем специального эксперимента. Метод достаточно прост, обладает малой трудоемкостью, позволяет достаточно точно определить свойства конкретного объекта. Вместе с тем, он требует оснащения изучаемого объекта экспериментальной аппаратурой и проведения специальных исследований. При экспериментальном методе невозможно выявить функциональные связи между свойствами перерабатываемых и получаемых веществ, режимными показателями технологического процесса и конструктивными характеристиками объекта. Этот недостаток не позволяет распространить на другие однотипные объекты результаты, полученные экспериментальным методом.

Экспериментально-аналитический метод заключается в составлении уравнений путем анализа явлений, происходящих в объекте, при этом численные значения коэффициентов полученных уравнений определяются экспериментально на реальном объекте. Являясь комбинацией аналитического и экспериментального способов определения свойств объектов, этот метод учитывает их преимущества и недостатки.

Ниже рассмотрены аналитический и экспериментальный методы определения свойств объектов.

3. Составление математического описания объекта

Составление математического описания объектов начинают с нахождения уравнений его материального или энергетического балансов (за бесконечно малый промежуток времени dt),

выявления кинетических закономерностей, гидродинамических условий и т. п. В полученных уравнениях раскрывают значения неизвестных и исключают промежуточные переменные. Нелинейные дифференциальные уравнения, которым соответствуют непрерывные статические характеристики с большим радиусом кривизны, линеаризуют.

Далее в линейной или линеаризованной математической модели объекта от абсолютных значений входных и выходных величин переходят к их приращениям. Последние, в свою очередь, заменяют безразмерными величинами, которые представляют собой отношения абсолютных приращений этих величин к их произвольно выбранным базисным значениям. В качестве таковых обычно используют значения величин в равновесном состоянии до нанесения возмущающего воздействия. (Базисные значения обозначают теми же буквами, что и сами переменные, но с индексом нуль.

Полученные уравнения приводят к общепринятой форме путем группирования в левой части всех членов, содержащих выходную величину объекта и ее производные, а в правой части — всех членов, содержащих входную величину объекта и ее производные. Последняя операция состоит в делении всех членов полученных уравнений на постоянный коэффициент при безразмерной выходной (или входной) величине.

Составим математическое описание нескольких объектов химической технологии и найдем их передаточные функции.

Пример II-1. Составить математическое описание смесителя постоянного объема V , обеспечивающего идеальное перемешивание жидкости (рис. II-16). В смеситель подаются жидкости, расходы и концентрации которых соответственно равны F_1 , Q_1 и Q_2 , F_2 . Выходной величиной смесителя является состав жидкости Q в смесителе и на выходе из него, а входными переменными — величины потоков на входе F_1 и F_2 , а также концентрация Q_1 . Причем $Q_1 > Q > Q_2$.

Для нахождения уравнения динамики смесителя составим полный материальный баланс, а также материальный баланс с учетом концентрации вещества в каждом потоке за промежуток времени dt

$$F_1 + F_2 = F \quad (\text{II, 26})$$

$$F_1 Q_1 dt + F_2 Q_2 dt = V dQ + F Q dt \quad (\text{II, 27})$$

где F — расход жидкости на выходе из смесителя. Преобразуем уравнение (II,27) с учетом формулы (II,26)

$$V \frac{dQ}{dt} + (F_1 + F_2)Q = F_1 Q_1 + F_2 Q_2 \quad (\text{II, 28})$$

Данное уравнение нелинейно, так как три его слагаемых представляют собой произведения переменных величин. Линеаризуем его, заменив каждую переменную на сумму базисного значения и приращения. Получим:

$$\begin{aligned} V \frac{d\Delta Q}{dt} + F_{10} Q_0 + F_{10} \Delta Q + Q_0 \Delta F_1 + F_{20} Q_0 + F_{20} \Delta Q + Q_0 \Delta F_2 = \\ = F_{10} Q_{10} + F_{10} \Delta Q_1 + Q_{10} \Delta F_1 + F_{20} Q_2 + Q_2 \Delta F_2 \end{aligned} \quad (\text{II, 29})$$

Уравнение смесителя при равновесном состоянии имеет вид

$$F_{10} Q_0 + F_{20} Q_0 = F_{10} Q_{10} + F_{20} Q_2 \quad (\text{II, 30})$$

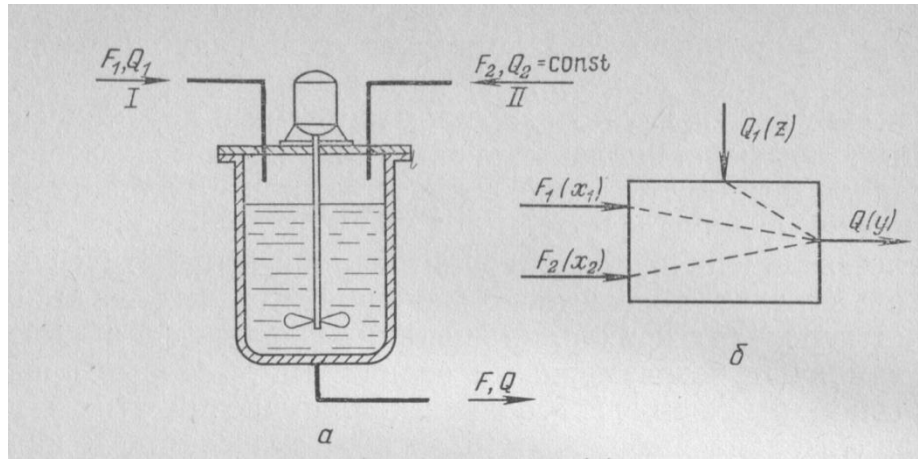


Рис. II-16. Схемы смесителя двух жидкостей (а) и его динамических каналов (б).

Вычтем почленно уравнение (11,30) из уравнения (11,29), одновременно учитывая, что $F_{10} + F_{20} = F_0$, и найдем уравнение смесителя в приращениях

$$V \frac{d\Delta Q}{dt} + F_0 \Delta Q = F_{10} \Delta Q_1 + (Q_{10} - Q_0) \Delta F_1 - (Q_0 - Q_2) \Delta F_2 \quad (\text{II}, 31)$$

Из этого уравнения следует, что концентрация вещества Q в смесителе возрастает с увеличением Q_1 и F_1 , так как $Q_{10} > Q_0$, и понижается с увеличением F_2 , так как $Q_0 > Q_2$ по условию.

Подставляя в уравнение (II,31) относительные величины

$$y = \frac{\Delta Q}{Q_0} \quad z = \frac{\Delta Q_1}{Q_{10}} \quad x_1 = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} \quad x_2 = \frac{\Delta F_2}{F_{20}}$$

получим:

$$V Q_0 \frac{dy}{dt} + F_0 Q_0 y = F_{10} Q_{10} z + (Q_{10} + Q_0) F_{10} x_1 - (Q_0 - Q_2) F_{20} x_2 \quad (\text{II}, 32)$$

Разделив все слагаемые уравнения (II,32) на сомножитель $F_0 Q_0$, окончательно найдем

$$T_0 \frac{dy}{dt} + y = k_1 z + k_2 x_1 - k_3 x_2 \quad (\text{II}, 33)$$

где $T_0 = V/F_0$ — постоянная времени объекта; k_1 — k_3 — коэффициенты усиления по каналам $Q_1 \rightarrow Q$, $F_1 \rightarrow Q$, $F_2 \rightarrow Q$:

$$k_1 = \frac{F_{10} Q_{10}}{F_0 Q_0} \quad k_2 = \frac{F_{10} (Q_{10} - Q_0)}{F_0 Q_0} \quad k_3 = \frac{F_{20} (Q_0 - Q_2)}{F_0 Q_0}$$

Таким образом, по всем трем каналам прохождения сигналов рассматриваемый смеситель представляет собой устойчивый объект 1-го порядка; его устойчивость объясняется наличием внутренней обратной связи.

Уравнение динамики смесителя в операторной форме:

$$(T_0 p + 1) y = k_1 z + k_2 x_1 - k_3 x_2 \quad (\text{II}, 34)$$

Передаточная функция объекта по его каналам описывается равенствами

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_0 p + 1} \quad W_2(p) = \frac{k_2}{T_0 p + 1} \quad W_3(p) = -\frac{k_3}{T_0 p + 1}$$

Уравнению (II,33) соответствует структурная схема, приведенная на рис. II-17.

Пример II-2. Составить математическое описание аппарата объемом $V \text{ м}^3$, в который подается газ под давлением $P_n \text{ кгс/м}^2 \text{ (Па)}$ в количестве $F_{\text{пр}}^{\text{м}}$ кг/с (рис. II-18, а), если из аппарата газ под давлением $P \text{ кгс/м}^2 \text{ (Па)}$ в количестве $F_{\text{р}}^{\text{м}}$ кг/с направляется к потребителям. На линиях притока и расхода газа установлены вентили, площади проходных сечений которых равны $A_{\text{пр}}$ и $A_{\text{р}}$, м^2 . Давление газа в расходной линии после вентиля равно нулю. При $F_{\text{пр}}^{\text{м}} = F_{\text{р}}^{\text{м}}$ давление газа в аппарате P постоянно, а при $F_{\text{пр}}^{\text{м}} > < F_{\text{р}}^{\text{м}}$ — увеличивается или уменьшается. Выходной величиной аппарата является изменение давления газа P , а входными переменными — изменение площадей проходных сечений вентилей $A_{\text{пр}}$ и $A_{\text{р}}$ и изменение давления поступающего газа P_n (рис. II-18,б).

Составим уравнение материального баланса газа, протекающего через аппарат за время dt

$$F_{\text{пр}}^{\text{м}} dt = V d\rho + F_{\text{р}}^{\text{м}} dt \quad (\text{II}, 35)$$

Таким образом, количество поступившего газа за время dt равно количеству газа, накопившегося в аппарате вследствие изменения плотности газа на $d\rho$, кг/м^3 , и количеству газа, вышедшего из аппарата за то же время.

Разделим уравнение (II,35) на dt и учтем, что

$$d\rho = \frac{1}{RT_{\text{г}}} dP$$

где R — газовая постоянная, $\text{м}^2 \text{с}^{-2} \text{К}^{-1}$; $T_{\text{г}}$ — абсолютная температура газа в резервуаре, К. Получим

$$\frac{V}{RT_{\text{г}}} \cdot \frac{dP}{dt} = F_{\text{пр}}^{\text{м}} - F_{\text{р}}^{\text{м}} \quad (\text{II}, 36)$$

Таким образом, неравенство между приходом газа в резервуар и его расходом приводит к изменению давления в резервуаре.

Рассмотрим случай сверхкритического истечения газа в дросселирующих органах. Допустим, что изменение состояния газа изотермическое, а его истечение является адиабатическим. Тогда имеем

$$\begin{cases} F_{\text{пр}}^{\text{м}} = \frac{\alpha_{\text{пр}} C}{\sqrt{RT_{\text{г}}}} A_{\text{пр}} P_n \\ F_{\text{р}}^{\text{м}} = \frac{\alpha_{\text{р}} C}{\sqrt{RT_{\text{г}}}} A_{\text{р}} P \end{cases} \quad (\text{II}, 37)$$

где

$$C = \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{1}{K-1}} \sqrt{\frac{2K}{K+1}}$$

K — показатель адиабаты газа; α коэффициент расхода газа через дросселирующий орган.

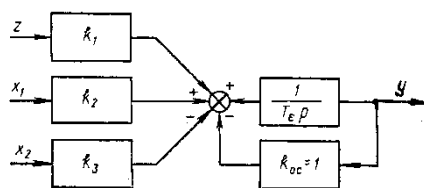


Рис. II-17. Структурная схема смесителя двух жидкостей.

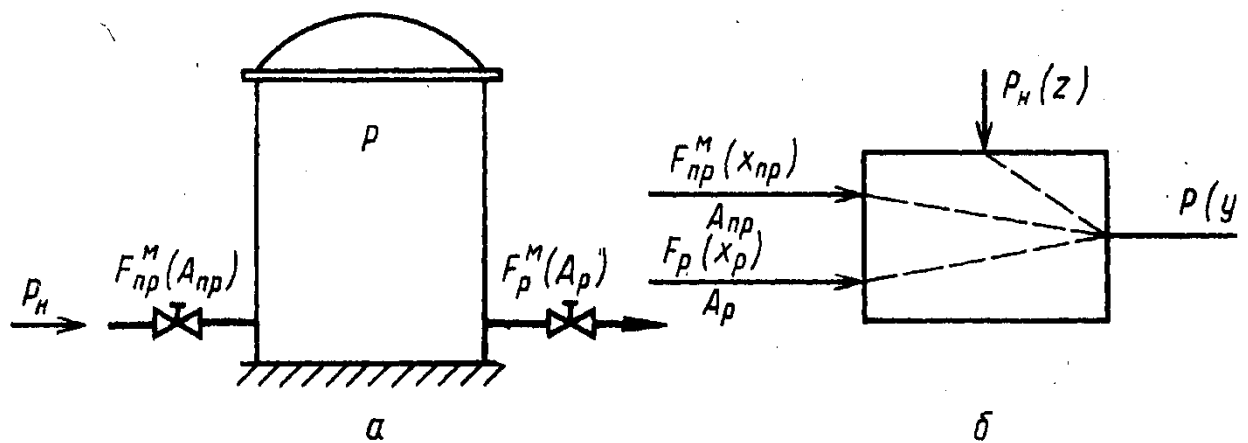


Рис. II-18. Схемы резервуара для газа (а) и его динамических канале

Подставляя выражения для F_{np}^M и F_p^M из уравнений (II,37) в формулу (II,36), получим

$$\frac{V}{RT_r} \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{\alpha_{np}C}{\sqrt{RT_r}} A_{np} P_H - \frac{\alpha_p C}{\sqrt{RT_r}} A_p P \quad (\text{II, 38})$$

Заменяя все переменные величины в уравнении (II,38) их конечными приращениями, отнесенными к базисным значениям, обозначаемым через P_0 , $P_{H,0}$, $L_{np,0}$ и $L_{p,0}$, и принимая во внимание, что приращение функции двух аргументов $f(x, y)$ определяется равенством

$$\Delta f(x, y) = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y \quad (\text{II, 39})$$

найдем дифференциальное уравнение переходного процесса объекта:

$$\begin{aligned} & \frac{VP_0}{RT_r} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) + \frac{\alpha_p C}{\sqrt{RT_r}} A_{p0} P_0 \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) = \\ & = \frac{\alpha_{np} C}{\sqrt{RT_r}} A_{np0} P_{H0} \left(\frac{\Delta P_H}{P_{H0}} \right) + \frac{\alpha_{np} C}{\sqrt{RT_r}} A_{np0} P_{H0} \left(\frac{\Delta A_{np}}{A_{np0}} \right) - \frac{\alpha_p C}{\sqrt{RT_r}} A_{p0} P_0 \left(\frac{\Delta A_p}{A_{p0}} \right) \end{aligned} \quad (\text{II, 40})$$

Учитывая равенства (II,37) и уравнение материального баланса объекта для статического состояния $F_{np0}^M = P_{p0}^M = F_o^M$, разделим все слагаемые уравнения (II,40) на постоянный коэффициент при отношении $\Delta P/P_0$. Получим

$$\frac{VP_0}{F_{oM} RT_r} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) + \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\Delta P_H}{P_{H0}} + \frac{\Delta A_{np}}{A_{np0}} - \frac{\Delta A_p}{A_{p0}} \quad (\text{II, 41})$$

Введем обозначения

$$\frac{VP_0}{F_{oM} RT_r} = T_0 \quad \frac{\Delta P}{P_0} = y \quad \frac{\Delta P_H}{P_{H0}} = z \quad \frac{\Delta A_{np}}{A_{np0}} = x_{np} \quad \frac{\Delta A_p}{A_{p0}} = x_p$$

и получим искомое уравнение, показывающее, что резервуар представляет собой устойчивый объект 1-го порядка

$$T_0 \frac{dy}{dt} + y = zx_{np} + x_p \quad (\text{II, 42})$$

Структурная схема аппарата, составленная в соответствии с равенством (II,42), приведена на рис. II-19.

Передаточные функции объекта по каналам $z \rightarrow y$, $x_{np} \rightarrow y$ и $x_p \rightarrow y$ описываются выражениями

$$W(p) = \frac{1}{T_0 p + 1} \quad \text{и} \quad W(p) = -\frac{1}{T_0 p + 1} \quad (\text{II, 43})$$

Пример II-3. Составить математическое описание теплообменника, в котором жидкий продукт нагревается насыщенным водяным паром (расход $F_{\text{п}}^M$, кг/с), до температуры $T_{\text{ж}}$, °С (рис. II-20, а). Расход продукта, проходящего через теплообменник равен $F_{\text{жс}}^M$ кг/с, его температура на входе составляет $T'_{\text{жс}}$, °С, а удельная теплоемкость $c_{\text{жс}}$, Дж*кг⁻¹*град⁻¹. Выходной величиной теплообменника является изменение температуры $T_{\text{жс}}$, входными величинами — изменение расхода пара $F_{\text{п}}^M$, расхода жидкого продукта $F_{\text{жс}}^M$ и его температуры $T'_{\text{жс}}$, в дальнейшем индекс «м» опущен.

При выводе уравнения динамики теплообменника принимаем следующие допущения: теплообменник обладает сосредоточенными параметрами, т.е. температура жидкости в теплообменнике $T_{\text{жс}}$ постоянна во всех точках объема; температура теплопередающих стенок $T_{\text{ст}}$ одинакова во всех точках; их термическое сопротивление пренебрежимо мало; коэффициент теплоотдачи α , Дж/(м²*с*град) между жидкостью и поверхностью металлических стенок, а также удельные теплоемкости жидкости $c_{\text{жс}}$ и материала стенок $C_{\text{ст}}$ постоянны во времени; насыщенный водяной пар при прохождении через теплообменник полностью конденсируется, отдает тепло фазового перехода и выводится в виде конденсата при той же температуре; тепло, выделяющееся при конденсации пара, расходуется на изменение температуры теплопередающих стенок и нагревание жидкого продукта.

С учетом сделанных допущений уравнение теплового баланса для теплопередающих стенок теплообменника за время dt :

$$F_{\text{п}} r dt = W_{\text{ст}} c_{\text{ст}} dT_{\text{ст}} + \alpha A (T_{\text{ст}} - T_{\text{жс}}) dt \quad (\text{II, 44})$$

где r — теплота фазового перехода, Дж/кг; $W_{\text{ст}}$ — масса теплопередающих стенок, кг; A — суммарная поверхность стенок, м².

Тепло, поступившее в теплообменник с жидкостью и полученное ею через металлические стенки от горячего теплоносителя за время dt , расходуется на увеличение температуры жидкости $dT_{\text{жс}}$, находящейся в аппарате и уходящей

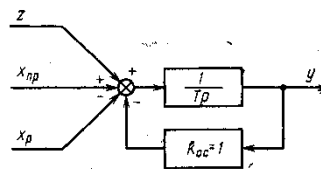


Рис. II-19. Структурная схема резервуара для газа

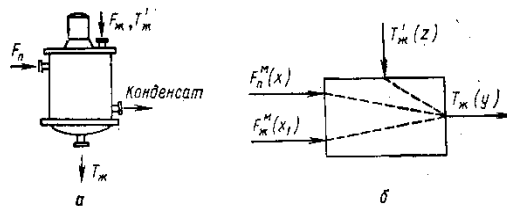


Рис II-20. Схема теплообменника (а) и его динамических каналов (б)

из него за тот же отрезок времени. Тогда уравнение теплового баланса для жидкости:

$$W_{\text{ж}} c_{\text{ж}} T'_{\text{ж}} dt + \alpha A (T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}) dt = W_{\text{ж}} c_{\text{ж}} dT_{\text{ж}} + W_{\text{ж}} c_{\text{ж}} T_{\text{ж}} dt \quad (\text{II}, 45)$$

где $W_{\text{ж}}$ — масса жидкости в теплообменнике, кг.

Перепишем уравнения (II,44) и (II,45) в следующем виде:

$$W_{\text{ст}} c_{\text{ст}} \frac{dT_{\text{ст}}}{dt} + \alpha A T_{\text{ст}} = F_{\text{п}} r + \alpha A T_{\text{ж}} \quad (\text{II}, 46)$$

$$W_{\text{ж}} c_{\text{ж}} \frac{dT_{\text{ж}}}{dt} + (F_{\text{ж}} c_{\text{ж}} + \alpha A) T_{\text{ж}} = F_{\text{ж}} c_{\text{ж}} dT'_{\text{ж}} + \alpha A T'_{\text{ст}} \quad (\text{II}, 47)$$

Заменяя в уравнениях (II,46) и (II,47) переменные их конечными приращениями, отнесенными к базисным значениям переменных ($T_{\text{ст0}}$, $F_{\text{п0}}$, $T_{\text{ж0}}$, $F_{\text{ж0}}$ и $T'_{\text{ж0}}$) учитывая равенство (II,39) и введя обозначения

$$y = \frac{\Delta T_{\text{ж}}}{T_{\text{ж0}}} \quad y_{\text{ст}} = \frac{\Delta T_{\text{ст}}}{T_{\text{ст}}} \quad x = \frac{\Delta F_{\text{п}}}{F_{\text{п0}}} \quad x_1 = \frac{\Delta F_{\text{ж}}}{F_{\text{ж0}}} \quad z = \frac{\Delta T'_{\text{ж}}}{T'_{\text{ж0}}}$$

Получим

$$W_{\text{ст}} c_{\text{ст}} T'_{\text{ст0}} \frac{dy_{\text{ст}}}{dt} + \alpha A T_{\text{ст0}} y_{\text{ст}} = F_{\text{п0}} r x + \alpha A T_{\text{ж0}} y \quad (\text{II}, 48)$$

$$W_{\text{ж}} c_{\text{ж}} T_{\text{ж}} \frac{dy}{dt} + (F_{\text{ж}} c_{\text{ж}} + \alpha A) T_{\text{ж0}} y = -F_{\text{ж0}} c_{\text{ж}} (T_{\text{ж0}} - T'_{\text{ж0}}) x_1 + F_{\text{ж0}} c_{\text{ж}} T'_{\text{ж0}} z + \alpha A T_{\text{ст0}} y_{\text{ст}} \quad (\text{II}, 49)$$

Или

$$T * \frac{dy_{\text{ст}}}{dt} + y_{\text{ст}} = k_2 x + k_5 y \quad (\text{II}, 50)$$

$$T ** \frac{dy_{\text{ст}}}{dt} + y = -k_1 x_1 + k_2 z + k_4 y_{\text{ст}} \quad (\text{II}, 51)$$

Где

$$T * = \frac{W_{\text{ст}} c_{\text{ст}}}{\alpha A} \quad T ** = \frac{W_{\text{ж}} c_{\text{ж}}}{F_{\text{ж0}} c_{\text{ж}} + \alpha A}$$

$$k_1 = \frac{F_{\text{ж0}} c_{\text{ж}} (T_{\text{ж0}} - T'_{\text{ж0}})}{(F_{\text{ж0}} c_{\text{ж}} + \alpha A) T_{\text{ж0}}} \quad k_2 = \frac{F_{\text{ж0}} c_{\text{ж}} T'_{\text{ж0}}}{(F_{\text{ж0}} c_{\text{ж}} + \alpha A) T_{\text{ж0}}}$$

$$k_3 = \frac{F_{\text{п0}} r}{\alpha A T_{\text{ст0}}} \quad k_4 = \frac{\alpha A T_{\text{ст0}}}{(F_{\text{ж0}} c_{\text{ж}} + \alpha A) T_{\text{ж0}}} \quad k_5 = \frac{T_{\text{ж0}}}{T_{\text{ст0}}}$$

Причем коэффициенты k_1 , k_2 , k_3 , k_4 и k_5 меньше единицы. Чтобы исключить из уравнения (II,50) переменную $y_{\text{ст}}$, продифференцируем второе из них по времени и выразим производную $dy_{\text{ст}}/dt$, а также переменную $y_{\text{ст}}$ из уравнения (II,51). Полученные выражения для $y_{\text{ст}}$ и $dy_{\text{ст}}/dt$ подставим в уравнение (II,50). Разделив все слагаемые полученного уравнения на коэффициент при y , равный $F_{\text{ж0}} c_{\text{ж}} T_{\text{ж0}} / \alpha A T_{\text{ст0}}$, и принимая во внимание равенство

$$F_{\text{п}} r = \alpha A (T_{\text{ст0}} - T_{\text{ж0}}) = F_{\text{ж0}} c_{\text{ж}} (T_{\text{ж0}} - T'_{\text{ж0}})$$

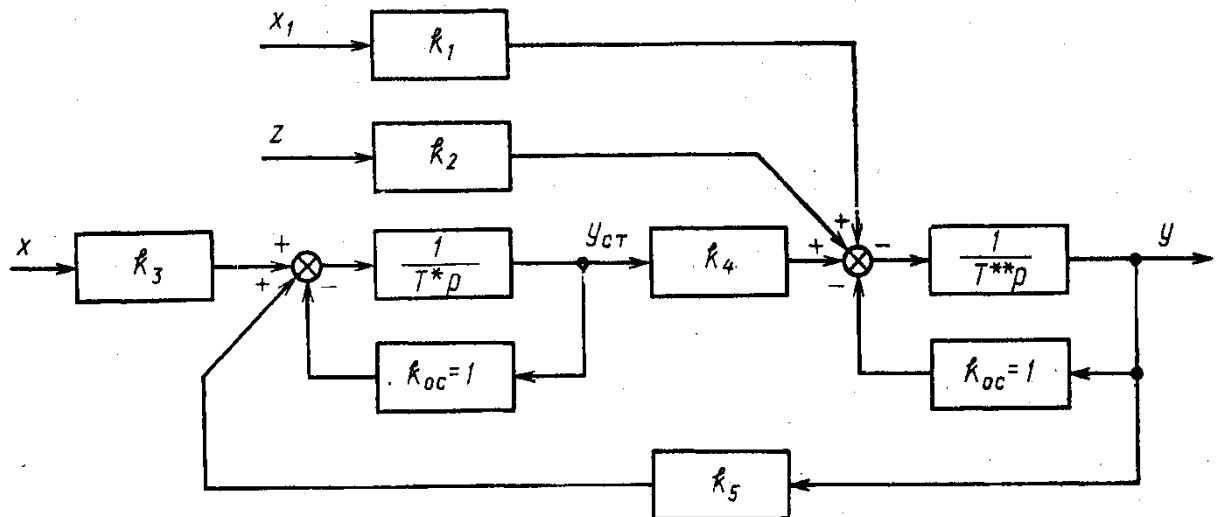


Рис. II-21. Структурная схема теплообменника.

получим искомое уравнение динамики теплообменника

$$T_1^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_2 \frac{dy}{dt} + y = kx - k \left(T_3 \frac{dx_1}{dt} + x_1 \right) + (1 - k) \left(T_3 \frac{dz}{dt} + z \right) \quad (\text{II}, 52)$$

Где

$$T_1^2 = \frac{W_{\text{ст}} c_{\text{ст}} W_{\text{ж}}}{\alpha A F_{\text{ж}0}} \quad T_2 = \frac{W_{\text{ст}} c_{\text{ст}}}{\alpha A} + \frac{W_{\text{ст}} c_{\text{ст}}}{F_{\text{ж}0} c_{\text{ж}}} + \frac{W_{\text{ж}}}{F_{\text{ж}0}} \quad T_3 = \frac{W_{\text{ст}} c_{\text{ст}}}{\alpha A} \quad k = \frac{T_{\text{ж}0} - T'_{\text{ж}0}}{T_{\text{ж}0}}$$

Рассматриваемый теплообменник является устойчивым объектом 2-го порядка. Уравнение (II,52) подтверждает, что увеличение расхода пара, x и температуры жидкости на входе z приведет к повышению ее температуры на выходе y , а возрастание расхода жидкости x_1 — к понижению величины y .

Передаточные функции теплообменника могут быть найдены по его уравнению динамики, а также по структурной схеме (рис. II-21), составленной по равенствам (II,50) и (II,51). Приведем без вывода передаточные функции теплообменника:

по каналу $x \rightarrow y$

$$W_x(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} \quad (\text{II}, 53)$$

о каналу $x_1 \rightarrow y$

$$W_{x1}(p) = -\frac{k(T_3 p + 1)}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} \quad (\text{II}, 54)$$

по каналу $z \rightarrow y$

$$W_z(p) = -\frac{(1-k)(T_3 p + 1)}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1} \quad (\text{II}, 55)$$

В соответствии с равенством (I,35) выходная величина теплообменника в операторной форме $Y(p)$ может быть определена по зависимости

$$Y(p) = W_x(p)X(p) + W_{x1}(p)X_1(p) + W_z(p)z(p) \quad (\text{II}, 56)$$

где $X(p)$, $X_1(p)$ и $Z(p)$ — операторные формы записи величин x , x_1 и z .

Пример II-4. Составить математическое описание химического реактора непрерывного действия, представляющего собой аппарат с мешалкой и охлаждающей рубашкой, в котором проводится экзотермическая реакция 1-го порядка. Объемный расход и температура подаваемой в него реакционной смеси составляют F , м³/с и T_n , К, а концентрация реагирующего вещества равна Q_n . Объект обладает сосредоточенными параметрами, т. е. во всем объеме реакционного пространства температура T , К и концентрация реагирующего компонента Q имеют одинаковые значения. Поток из реактора выходит с теми же значениями величин. Тепло реакции снимается хладо-агентом, температура которого равна T_c , К, а расход через охлаждающую рубашку реактора поверхностью A , м² составляет F_c , м³/с. Плотности ρ , кг/м³ исходного и прореагировавшего веществ одинаковы. Удельные теплоемкости c , Дж/(кг-град) продуктов на входе и выходе из реактора равны между собой. Объем реакционной массы V , м³, постоянен.

Рассматриваемый химический реактор представляет собой динамическую систему с пятью входными величинами F , Q_n , T_n , F_c , T_c , каждая из которых приводит к изменению двух его выходных величин Q и T (см. рис. II-3).

Математическое описание нестационарного режима работы химического реактора должно представлять собой систему из двух уравнений (по числу выходных величин объекта): материального и теплового балансов.

При принятых допущениях уравнение материального баланса реактора по реагирующему компоненту в переходном режиме:

$$FQ_n + VS = FQ + V \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II, 57})$$

где $S = K(Q_{\max} - Q)$ — скорость реакции; $Q_{\max}$ — максимально достижимая концентрация целевого компонента; $K = a \cdot \exp(-E/RT)$ — константа скорости реакции; a — постоянный коэффициент, E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная.

С учетом последних выражений уравнение материального баланса реактора:

$$FQ_n + Va(Q_{\max} - Q) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = FQ + \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II, 58})$$

Уравнение теплового баланса реактора в неравновесном режиме может быть записано следующим образом:

$$F_c \rho T_n + q_p = F_c \rho T + V_c \rho \frac{dT}{dt} + q_c \quad (\text{II, 59})$$

Первые слагаемые левой и правой частей уравнения (II,59) определяют величины тепловых потоков, связанных с поступлением в реактор исходного и отводом из него прореагировавшего веществ; слагаемое q_p определяет тепловой поток, обусловленный теплотой реакции; второе слагаемое в правой части отражает теплоаккумулирующие свойства реактора; слагаемое q_c определяет тепловой поток, отводимый системой охлаждения. При этом

$$q_p = rP\rho(Q - Q_n) \quad (\text{II, 60})$$

$$q_c = K_{ct}A(T - T_c) \quad (\text{II, 61})$$

где r — теплота реакций; K_{ct} — коэффициент теплопередачи через охлаждаемую стенку.

Принимая упрощающие допущения (термическое сопротивление тепло передающей стенки равно нулю, коэффициент теплоотдачи от реакционной смеси к стенке равен бесконечности), а также допуская, что процесс теплоотдачи от стенки к хладоагенту описывается зависимостью

$$Nu = 0.33Re^{0.5}Pr^{0.33}$$

(где Nu , Re и Pr — критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля), можно считать, что коэффициент теплопередачи $K_{ст}$ пропорционален корню квадратному из расхода хладагента F_c , т. е.

$$K_{ст} = b\sqrt{F_c} \quad (\text{II, 62})$$

где b — коэффициент пропорциональности.

Из уравнений (II, 61) и (II, 62) найдем

$$q_c = bA\sqrt{F_c}(T - T_c) \quad (\text{II, 63})$$

Подставляя зависимости для q_p и q_c из (II, 60) и (II, 63) в (II, 59), получим уравнение теплового баланса реактора

$$F_c\rho T_H + rF\rho(Q - Q_H) = F_c\rho T + Vc\rho\frac{dT}{dt} + bA\sqrt{F_c}(T - T_c) \quad (\text{II, 64})$$

Составим уравнения материального и теплового балансов реактора для равновесных режимов его работы

$$F_0Q_{H0} + Va(Q_{max} - Q_0)\exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = F_0Q_0 \quad (\text{II, 65})$$

$$F_{0c}\rho T_{H0} + rF_{0c}\rho(Q_0 - Q_{H0}) = F_{0c}\rho T_0 + bA\sqrt{F_{c0}}(T_0 - T_{c0}) \quad (\text{II, 66})$$

где F_0 , T_0 , Q_0 , Q_{H0} , F_{c0} , T_{H0} , T_{c0} — базисные значения соответствующих величин реактора.

После линеаризации нелинейных слагаемых в (II, 58) и (II, 64), составления системы уравнений реактора в приращениях и введения относительных входных и выходных величин

$$y_1 = \frac{\Delta Q}{Q_0} \quad y_2 = \frac{\Delta T}{T_0} \quad x_1 = \frac{\Delta F}{F_0} \quad x_2 = \frac{\Delta F_c}{F_{c0}} \quad x_3 = \frac{\Delta Q_H}{Q_{H0}} \quad x_4 = \frac{\Delta T_H}{T_{H0}} \quad x_5 = \frac{\Delta T_c}{T_{c0}}$$

получим:

$$VQ_0\frac{dy_1}{dt} + Q_0\left[F_0 + Va\exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right)\right]y_1 = -F_0(Q_0 - Q_{H0})x_1 + F_0Q_{H0}x_3 + VT_0(Q_{max} - Q_0)a\exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right)\left(\frac{E}{RT_0^2}\right)y_2 \quad (\text{II, 67})$$

$$Vc\rho T_0\frac{dy_2}{dt} + T_0(F_{0c}\rho + bA\sqrt{F_{c0}})y_2 = F_{0c}\rho[r(Q_0 - Q_{H0}) - c(T_0 - T_{H0})]x_1 - \frac{1}{2}bA\sqrt{F_{c0}}(T_c - T_{c0})x_2 - r\rho F_{0c}Q_{H0}x_3 + F_{0c}\rho T_{H0}x_4 + bA\sqrt{F_{c0}}T_{c0}x_5 + r\rho F_{0c}Q_0y_1 \quad (\text{II, 68})$$

Если ввести обозначения

$$k_0 = a\exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \quad k_0^* = \frac{E}{RT_0^2} \quad k^* = bA\sqrt{F_{c0}}$$

поведение рассматриваемого реактора в неравновесном режиме описывается системой уравнений:

$$T_1\frac{dy_1}{dt} + y_1 = -k_1x_1 + k_2x_3 + k_3y_2 \quad (\text{II, 69})$$

$$T_2\frac{dy_2}{dt} + y_2 = k_4x_1 - k_5x_2 - k_6x_3 + k_7x_4 + k_8x_5 + k_9y_1 \quad (\text{II, 70})$$

где :

$$T_1 = \frac{V}{F_0 + V k_0} \quad T_2 = \frac{V}{F_{c0}\rho + k^*}$$

$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{F_0(Q_0 - Q_{H0})}{Q_0(F_0 + V k_0)} & k_1 &= \frac{F_0 Q_{H0}}{Q_0(F_0 + V k_0)} & k_3 &= \frac{V T_0(Q_{max} - Q_0) k_0 k_0^*}{Q_0(F_0 + V k_0)} \\
k_4 &= \frac{k^*(T_0 - T_{c0})}{(F_0 c \rho + k^*) T_0} & k_5 &= \frac{k^*(T_0 - T_{c0})}{2(F_0 c \rho + k^*) T_0} & k_6 &= \frac{r \rho F_0 Q_{H0}}{(F_0 c \rho + k^*) T_0} \\
k_7 &= \frac{F_0 c \rho T_{H0}}{(F_0 c \rho + k^*) T_0} & k_8 &= \frac{k^* T_{c0}}{(F_0 c \rho + k^*) T_0} & k_9 &= \frac{r \rho F_0 Q_0}{(F_0 c \rho + k^*) T_0}
\end{aligned}$$

Далее рассмотрим определение некоторых передаточных функций реактора. Для нахождения, например, передаточной функции $W_{11}(p)$ по каналу «расход исходного продукта F — концентрация Q вещества в потоке на выходе», т. е. по каналу $x_1 \rightarrow y_1$, запишем уравнение динамики в операторной форме, исключив предварительно все остальные входные величины.

$$(T_1 p + 1) y_1 = -k_1 x_1 + k_3 y_2 \quad (\text{II}, 71)$$

$$(T_2 p + 1) y_2 = k_4 x_1 + k_9 y_1 \quad (\text{II}, 72)$$

Выражая из полученного y_2 , подставляя его в уравнение (II, 71) и находя отношение y_1/x_1 , найдем

$$W_{11}(p) = \frac{k_3 k_4 - k_1 (T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) - k_3 k_9} \quad (\text{II}, 73)$$

Покажем также нахождение передаточных функций по структурной схеме реактора, приведенной на рис. II-22 и составленной в соответствии с его математическим описанием. Для нахождения, например, передаточной функции $W_{22}(p)$ по каналу «расход хладагента F_c — температура потока на выходе из реактора T », т. е. по каналу $x_2 \rightarrow y_2$, составим структурную схему реактора по каналу $x_2 \rightarrow y_2$ и ее упрощенные варианты (рис. II-23). Передаточные функции динамических звеньев упрощенных схем определяются равенствами:

$$W^*(p) = \frac{1}{T_2 p + 1} \quad W^{**}(p) = \frac{1}{T_1 p + 1} \quad W_{oc}(p) = \frac{k_3 k_9}{T_1 p + 1}$$

Искомая же передаточная функция имеет вид:

$$W_{22}(p) = - \frac{k_5 (T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) - k_3 k_9} \quad (\text{II}, 74)$$

Аналогичным образом находят передаточные функции и по другим каналам. Укажем, что знаменатели всех передаточных функций имеют одинаковое выражение, которое обозначим через $D(p) = (T_1 p + 1)(T_2 p + 1) - k_3 k_9$. Выражения передаточных функций химического реактора с учетом этого обозначения сведены в табл. II.2, где также приведены обозначения соответствующих входных и выходных величин.

Из приведенных примеров видно, что поведение одномерного объекта в неравновесном режиме описывается одним уравнением динамики, а многомерного объекта — системой уравнений, число которых равно числу выходных величин объекта. При этом объект обладает устойчивостью только при наличии внутренней отрицательной обратной связи. Уравнения динамики объектов химической технологии могут быть составлены с достаточной точностью лишь для сравнительно ограниченного числа простых объектов с небольшим числом входных и выходных величин. С усложнением взаимосвязей между входными и выходными величинами и при большом числе возмущений

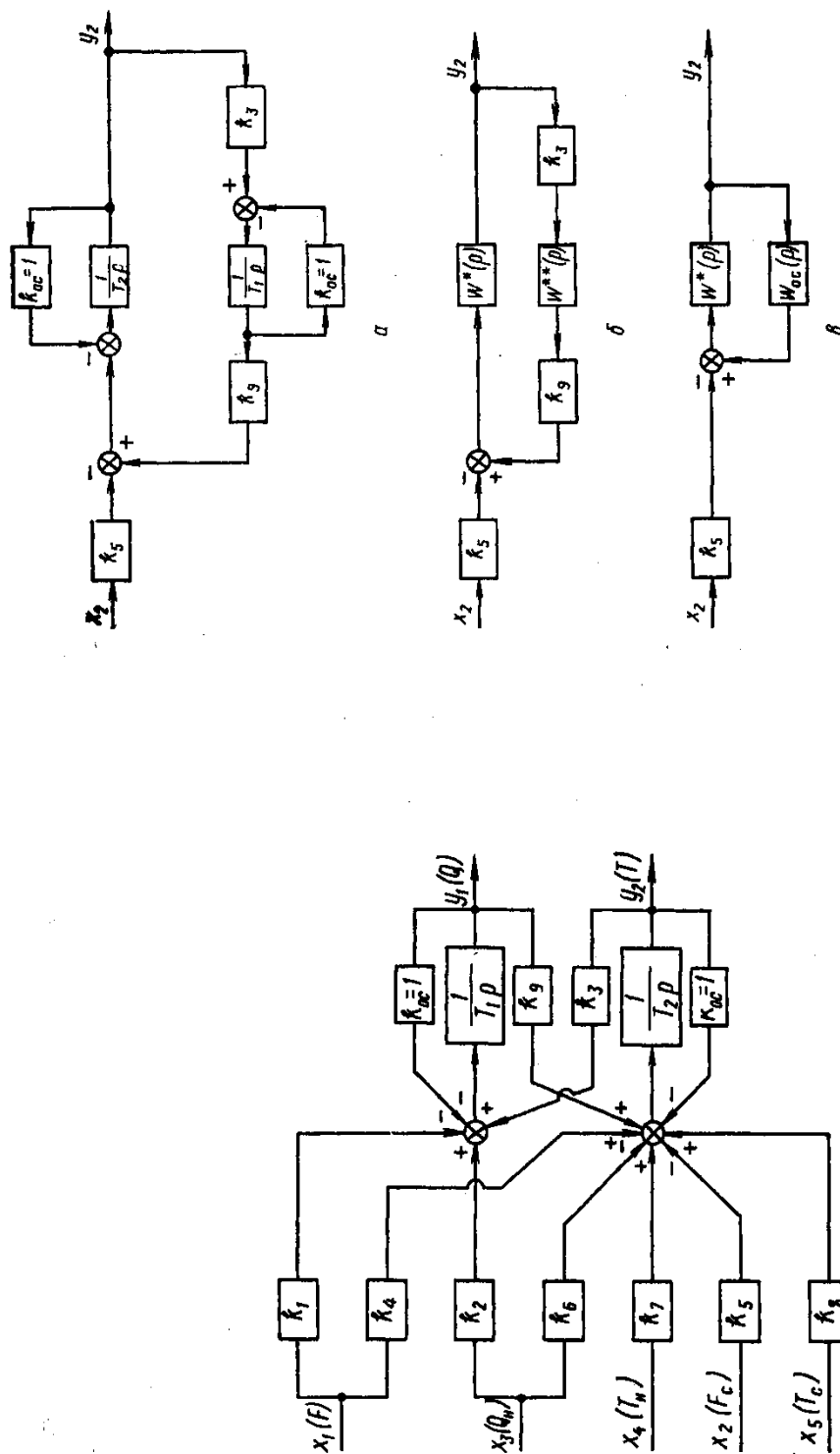


Рис. II-22. Структурная схема химического реактора.

трудоемкость математического описания объектов сильно возрастает. Это приводит к необходимости принятия ряда упрощающих допущений, что снижает адекватность получаемого описания реальному объекту.

Таблица II.2. Передаточные функции химического реактора

Величина		Передаточная функция
входная	выходная	
F	Q	$W_{11}(p) = [k_3 k_4 - k_1 (T_2 p + 1)]/D(p)$
F_c	Q	$W_{21}(p) = -k_5 k_3/D(p)$
Q_H	Q	$W_{31}(p) = [k_2 (T_3 p + 1) - k_3 k_6]/D(p)$
T_H	Q	$W_{41}(p) = k_7 k_3/D(p)$
T_c	Q	$W_{51}(p) = k_8 k_3/D(p)$
F	T	$W_{12}(p) = [k_4 (T_1 p + 1) - k_5 k_1]/D(p)$
F_c	T	$W_{22}(p) = -k_5 (T_1 p + 1)/D(p)$
Q_H	T	$W_{32}(p) = -[k_6 (T_1 p + 1) + k_3 k_2]/D(p)$
T_H	T	$W_{42}(p) = k_7 (T_1 p + 1)/D(p)$
T_c	T	$W_{52}(p) = k_8 (T_1 p + 1)/D(p)$

Рис. II-23. Структурная схема химического реактора по динамическому каналу $x_2 \rightarrow y_2$ (а) и ее последовательные упрощения (б, в).

4. Экспериментальное определение свойств объекта

В инженерной практике свойства промышленных объектов (химические реакторы, ректификационные колонны, абсорберы и др.) обычно выявляют экспериментальным путем. С этой целью технологический объект оснащают аппаратурой для нанесения входных типовых возмущений и определения его ответной реакции во времени. <При этом предусматривают: планирование и подготовку эксперимента, проведение эксперимента с целью нахождения временных или частотных характеристик и обработку полученных экспериментальных зависимостей.

Снятие временных характеристик проводят на реальном объекте, оснащенном аппаратурой в соответствии со схемой, приведенной на рис. II-24. Все измерительные преобразователи и исполнительные устройства обычно относят к объекту. Быстродействие всех элементов используемой аппаратуры в целом должно значительно превышать быстродействие объекта.

Для снятия временных характеристик объект исследования приводят в равновесное состояние, а затем с помощью панели дистанционного управления и исполнительного устройства наносят на вход объекта возмущающее воздействие известной формы (ступенчатое или импульсное). Реакция объекта на это возмущение (кривая разгона или импульсная характеристика) регистрируется в координатах: выходная величина — время.

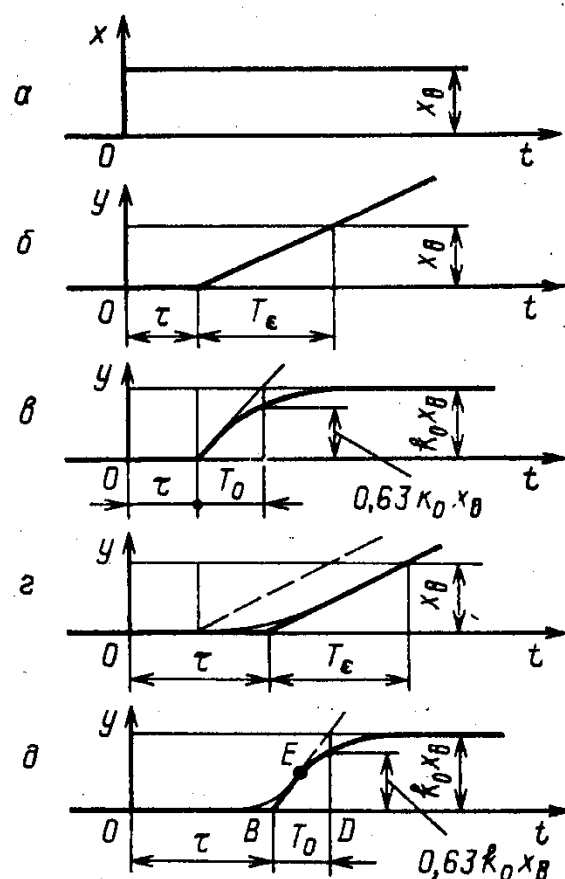
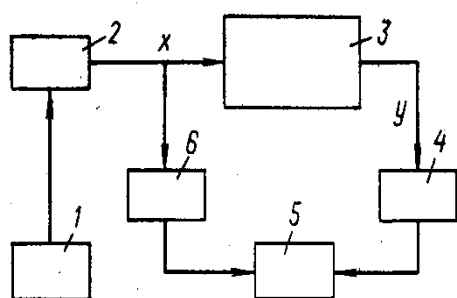


Рис. II-24. Схема установки аппаратуры для определения временных (или частотных) характеристик объекта:

1 — панель дистанционного управления (или генератор гармонических колебаний); 2 — исполнительное устройство; 3 — исследуемый объект; 4, 6 — измерительные преобразователи выходной и входной величин соответственно; 5 — вторичный регистрирующий прибор.

Рис. II-25. Ступенчатое возмущение (а) и кривые разгона для одноемкостных (б, в) и двухъемкостных (г, д) объектов регулирования: б, г — нейтральных; в, д — устойчивых.

Снятие кривой разгона предусматривает нанесение на объект ступенчатого возмущения путем энергичного изменения степени открытия проходного сечения регулирующего органа; при этом отмечают величину и момент нанесения возмущения. Изменение выходной величины регистрируют до тех пор, пока объект не примет нового установившегося значения (объект устойчивый) или пока скорость изменения выходной величины не станет постоянной (объект нейтральный).

Кривые разгона обычно определяют, на действующем (находящемся в промышленной эксплуатации) объекте, изменяя его входную величину на несколько процентов. Использование такого сравнительно небольшого возмущения обусловлено тем, что реакция объекта не должна выходить за пределы ограничений, установленных технологическими соображениями.

Снятие импульсной характеристики предусматривает нанесение на объект импульсного возмущения последовательного в виде двух ступенчатых возмущений, равных по величине, но противоположных по направлению, с интервалом по времени Δt . Изменение выходной величины регистрируется до тех пор, пока скорость ее изменения не станет равной нулю. При этом выходная величина может принять то же значение, что и до нанесения возмущения (устойчивый объект) или другое значение (нейтральный объект).

Импульсную переходную характеристику снимают в случае, если продолжительное ступенчатое возмущение приводит к нарушению нормального режима работы объекта, вследствие отклонения регулируемой величины от допустимых значений.

Если объект имеет несколько входных величин, то во время снятия временных характеристик по определенному каналу необходимо следить за постоянством остальных величин, поскольку их изменение может привести к дополнительному нежелательному изменению интересующей нас выходной технологической величины.

По экспериментально полученной переходной характеристике объекта можно определить свойства, которыми он обладает (см. табл. II.1), а также оценить эти свойства.

Аппроксимация переходных характеристик объектов. Определение по кривой разгона свойств нейтрального и устойчивого объектов 1-го порядка с запаздыванием при ступенчатом возмущении x_e показано на рис. II-25, а, б, в.

В первом приближении объекты 2-го порядка можно аппроксимировать двумя последовательно соединенными звеньями. Нейтральные объекты 2-го порядка аппроксимируют звеном запаздывания и нейтральным звеном 1-го порядка, а устойчивые объекты 2-го порядка — звеном запаздывания и аperiодическим звеном 1-го порядка.

При аппроксимации нейтрального объекта 2-го порядка с запаздыванием (рис. II-25, г) через ту часть его кривой разгона, где выходная величина изменяется с постоянной скоростью, проводят наклонную прямую до пересечения с осью абсцисс и принимают, что выходная величина объекта изменяется сначала по горизонтальной, а затем по вновь проведенной наклонной прямой. Время запаздывания τ и время разгона T_e такого объекта определяют по графику.

При аппроксимации устойчивого объекта второго порядка с запаздыванием (рис. II-25, д) через точку перегиба E его кривой разгона проводят касательную до пересечения с осью абсцисс в точке B и принимают, что выходная величина объекта изменяется по ломаной кривой OBE и далее по кривой разгона. Время запаздывания τ и постоянную времени объекта T_0 находят по графику: $\tau = OB$; $T_0 = BD$.

Именно такую аппроксимацию объектов обычно применяют для определения их свойств в численном выражении с целью последующего нахождения оптимальных значений настроечных параметров регуляторов (см. гл. V).

Известны также методы более точной аппроксимации объектов 2-го порядка. Например, устойчивые объекты 2-го порядка с запаздыванием или без него, кривые разгона которых имеют S-образную форму (рис. II-26), можно аппроксимировать следующим образом. Непосредственно по графику кривой разгона

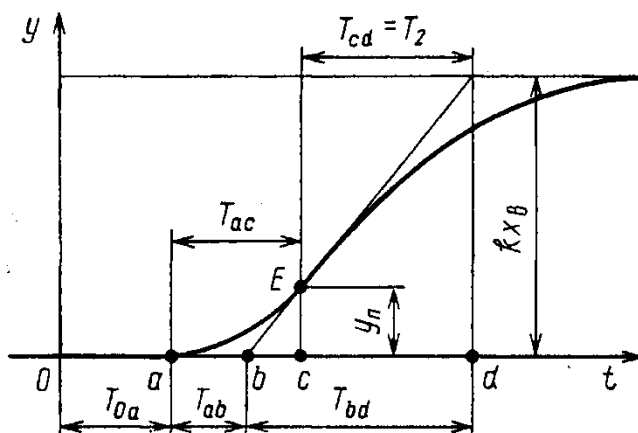


Рис. II-26. Нахождение постоянных времени объекта по S-образной кривой разгона.

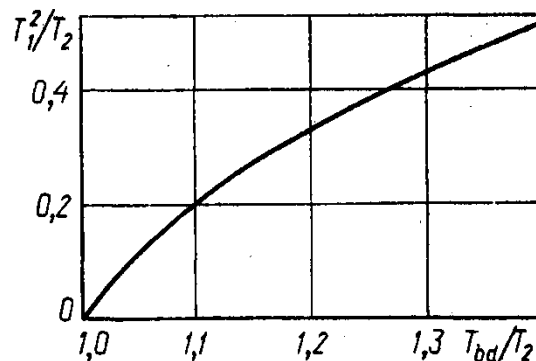


Рис. II-27. Зависимость постоянной T_1^2/T_2 от T_{bd}/T_2 .

находят значения коэффициента усиления объекта $k = kx_B/x_B$ и времени действительного запаздывания если оно есть, по отрезку oa ($\tau_d = T_{0a}$). Для определения же постоянных T_1^2 и T_2 к точке перегиба E кривой разгона проводят касательную до пересечения с осью абсцисс и горизонталью, ордината которой равна kx_B . На этих горизонтальных прямых откладывают подкасательные T_{bd} и T_{cd} и определяют их величины. Отрезок cd численно равен постоянной T_2 ($T_2 = T_{cd}$). Постоянную же T_1^2 находят по отношению T_{bd}/T_2 , используя зависимость, приведенную на рис. II-27. Отметим, что S-образные кривые разгона описываются уравнением устойчивого объекта 2-го порядка только при соблюдении условия $T_{bd}/T_2 \leq 1.4$.

При нарушении этого соотношения экспериментально полученные S-образные характеристики могут быть описаны уравнениями более высокого порядка. В качестве примера на рис. II-28 приведены переходные характеристики устойчивых объектов 1 — 4 - го порядков. При определении численных значений свойств объектов 3-го и более высоких порядков по переходным характеристикам последние аппроксимируют цепочкой последовательно соединенных одного или нескольких апериодических звеньев 1-го порядка, имеющих одинаковые постоянные времени T , и звеном запаздывания, условное время которого равно τ_y . Передаточная функция такого соединения

$$W(p) = \frac{k}{(Tp+1)^n} e^{-p\tau_y} \quad (\text{II, 75})$$

где $n=1, 2, 3, \dots$ — число апериодических звеньев.

Сначала экспериментально полученную S-образную кривую разгона обрабатывают так, как это показано на рис. II-26, находят величины T_{ab} и T_{bd} и по ним определяют отношение T_{ab}/T_{bd} . Затем, используя данные таблицы II.3, устанавливают порядок объекта n .

При проведении касательной к точке перегиба кривой разгона учитывают, что координаты точки E (рис. II-26) и отношение

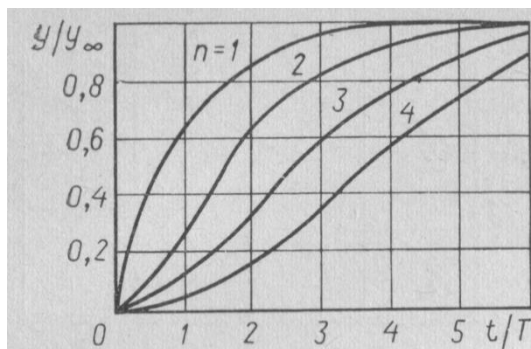


Рис. II-28. Переходные характеристики объектов n -го порядка.

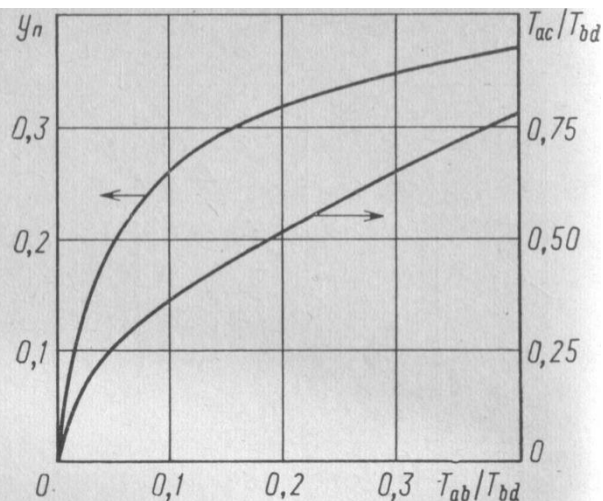


Рис. II-29. Зависимость координаты точки перегиба S-образной переходной характеристики от отношения T_{ab}/T_{bd} .

отрезков T_{ab}/T_{bd} связаны между собой зависимостями, приведенными на рис. II-29. Это облегчает нахождение точки перегиба и позволяет скорректировать ее местоположение.

Если отношение T_{ab}/T_{bd} с заданной точностью равно табличному значению, то объект соответствует определенному порядку. Если же оно отличается от имеющегося в таблице, то порядок объекта устанавливают по ближайшему меньшему табличному значению T_{ab}/T_{bd} и принимают, что передаточная функция описывается равенством (II,75). При $T_{ab}/T_{bd} < 0,104$ порядок объекта равен единице ($n=1$) и величины T и τ_y находят по переходной характеристике:

$$T = T_{bd} \quad \tau_y = T_{ab}$$

Если порядок объекта выше единицы, то сначала определяют постоянные времени входящих в него апериодических звеньев

$$T = T_{bd}/k_1 \quad (\text{II, 76})$$

а затем вычисляют значение времени запаздывания τ_1

$$\tau_1 = k_2 T \quad (\text{II, 77})$$

Числовые значения постоянных k_1 и k_2 при известном порядке объекта приведены в табл. II.3. Условное время запаздывания

Таблица II.3. Данные для определения порядка объекта и параметров его передаточной функции

T_{ab}/T_{bd}	n	k_1	k_2
0	1	1	0
0,104	2	2,718	0,282
0,218	3	3,695	0,805
0,319	4	4,463	1,425
0,410	5	5,119	2,100

объекта τ_y находят по равенству

$$\tau_y = T_{ab} - \tau_1 \quad (\text{II, 78})$$

Если на экспериментальной кривой разгона имеется участок запаздывания ОА, то это экспериментально найденное время запаздывания $\tau_d = T_{oa}$ необходимо прибавить к величине T_{ab} (объект 1-го порядка) или разности $T_{ab} - \tau_1$ (объект 2-го или более высокого порядка). Таким образом, для объектов 1-го порядка общее время запаздывания τ объекта можно определить по равенству

$$\tau = \tau_d + \tau_y \quad (\text{II, 79})$$

а для объектов 2-го порядка — по равенству

$$\tau = \tau_d + \tau_y - \tau_1 \quad (\text{II, 80})$$

Коэффициент усиления объекта k находят по отношению

$$k = \frac{y}{x} = \frac{y_T - y_{T0}}{y_{T0}} \cdot \frac{x_{p0}}{x_p - x_{p0}} \quad (\text{II, 81})$$

Пример II-5. Найти передаточную функцию теплообменника, в котором жидкость нагревается водяным паром, по экспериментально снятой кривой разгона $T_{жс} = f(t)$, полученной при ступенчатом изменении расхода греющего пара относительно номинального значения $\Delta F_n / F_{n0}$ на 7%. Заданное значение температуры жидкости на выходе $T_{жс0}$ равно 91 °С. Результаты эксперимента сведены в табл. II.4.

По приведенным в табл. II.4 данным строим кривую разгона (рис. II-30). Из рисунка следует, что за конечное значение температуры $T_{ж\infty}$ можно принять температуру 94,7 °С, а полученное экспериментально время запаздывания равно $T_{oa} = 5$ с. Проведя касательную к точке перегиба кривой разгона, получаем $T_{ba} = 4,5$ с, $T_{bd} = 32,5$ с, отношение $T_{ab} / T_{bd} = 0,1385$. Сравнивая это значение с данными табл. II.3, присваиваем объекту 2-й порядок.

Для объекта 2-го порядка вычисляем значение T

$$T = \frac{T_{bd}}{k_1} = \frac{32,5}{2,718} = 11,96 \approx 12 \text{ с}$$

Находим значение времени запаздывания τ_1

$$\tau_1 = 0,282T = 0,282 \cdot 12 = 3,37 \approx 3,4 \text{ с}$$

Таблица II.4. Экспериментальные и расчетные данные кривой разгона теплообменника

Время t , с	Температура жидкости $T_{ж}$, °С		Время t , с	Температура жидкости $T_{ж}$, °С	
	экспериментальная	расчетная		экспериментальная	расчетная
0	91,00	91,00	30	93,25	93,19
5	91,00	91,00	40	93,75	93,86
10	91,25	91,16	50	94,20	94,25
15	91,75	91,63	75	94,50	94,62
20	92,25	92,19	100	94,75	94,68
25	92,75	92,68			

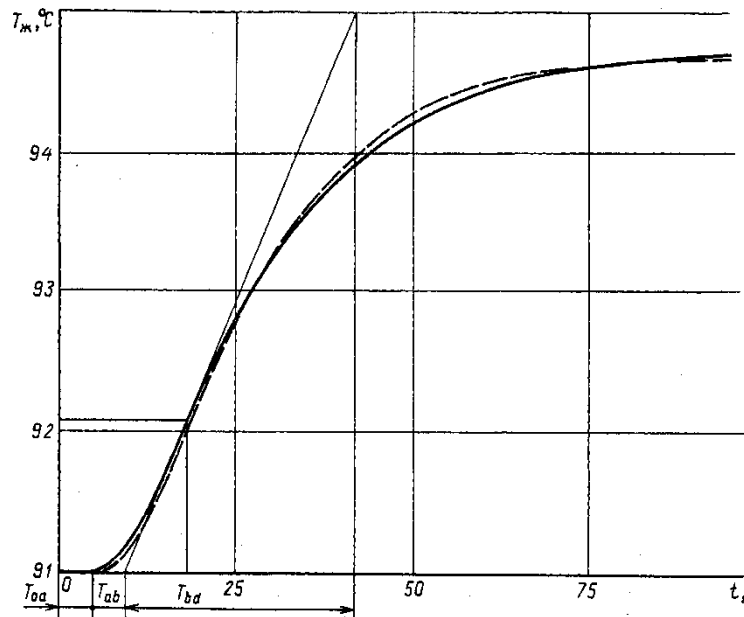


Рис. II-30. Кривая разгона теплообменника, полученная эксперимен-
та, (сплошная линия) и расчетным путем после аппроксимации объекта
(пунктир).

Определяем окончательное значение времени запаздывания τ

$$\tau = T_{0a} + \tau_y - \tau_1 = 5 + 4.5 - 3.4 = 6.1 \text{ с}$$

В заключение вычисляем коэффициент усиления объекта k

$$k = \frac{y}{x} = \frac{\Delta T_{ж}}{T_{ж0}} \cdot \frac{F_{п0}}{\Delta F_{п}} = \frac{94.7 - 91}{91} \cdot \frac{100}{7} \approx 0.58$$

Находим искомую передаточную функцию теплообменника

$$W(p) = \frac{k}{(Tp+1)^n} e^{-p\tau} = \frac{0.58}{(12p+1)^2} e^{-6.1p} \quad (\text{II, 82})$$

Покажем соответствие найденной передаточной функции теплооб-
менника его переходной характеристике $h(t)$, а затем и кривой разгона $T_{ж}(t)$
при указанном в условии возмущении. Для этого, умножая передаточную
функцию (II,82) на изображение возмущения $l(t)$, получим изображение вы-
ходной величины теплообменника, по которому с помощью зависимостей,
приведенных в табл. II. 1, а также, учитывая свойства запаздывания в области
вещественного переменного [см. Приложение 1, формула (11)], найдем соот-
ветствующий объекту оригинал

$$h(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < t < 6.1 \\ k \left[1 - \left(1 + \frac{t-\tau}{T} \right) e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right] & \text{при } t \geq \tau \end{cases}$$

После подстановки числовых значений выражение принимает вид

$$h(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < t < 6.1 \\ 0.58 \left[1 - \left(1 + \frac{t - 6.1}{12} \right) e^{-\frac{t - 6.1}{12}} \right] & \text{при } t \geq 6.1 \end{cases}$$

Кривую разгона теплообменника найдем из зависимости

$$\frac{\Delta T_{\text{ж}}}{T_{\text{ж}0}} = h(t) \frac{\Delta F_{\text{п}}}{F_{\text{п}0}}$$

Откуда получим

$$T_{\text{ж}} = T_{\text{ж}0} \left[1 + h(t) \frac{\Delta F_{\text{п}}}{F_{\text{п}0}} \right] = 91[1 + 0.07h(t)]$$

На рисунке II-30 эта расчетная зависимость показана пунктиром. Удовлетворительное совпадение экспериментальной и расчетных кривых свидетельствует о возможности представления теплообменника в виде двух апериодических звеньев 1-го порядка и звена запаздывания, соединенных последовательно.

Определение частотных характеристик. Для снятия частотных характеристик используют экспериментальную схему, аналогичную приведенной на рис. II-24. Возмущение на объект наносят генератором гармонических инфранизких колебаний (нижняя граница частот $\omega = 0,001\text{—}0,0001$ Гц), в конструкции которого должна быть предусмотрена возможность изменения амплитуды и частоты гармонических колебаний.

В реальных объектах химической технологии при увеличении частоты со колебания регулируемой величины обычно уменьшаются по амплитуде и все более отстают по фазе от колебаний возмущения. Поэтому при экспериментальном определении частотных характеристик сначала определяют реакцию объекта на известное входное воздействие при нулевой частоте, после чего подают колебания небольшой частоты ω_1 а затем — колебания с частотами $\omega_2, \omega_3, \omega_4$ и т. д., каждая из которых вдвое больше предыдущей. Частоту входных колебаний увеличивают до значения $\omega_{\text{ср}}$, называемого частотой «среза», при котором выходная величина объекта имеет отклонение, не превышающее 5% от $x_{\text{вых}0}$. Амплитуду колебаний на входе устанавливают одинаковой при разных частотах.

Вследствие трудности формирования гармонических колебаний на вход объекта часто подают колебания типа «прямоугольная волна». Для получения таких колебаний плунжер регулирующего органа, установленного на потоке, который подвергается возмущению, необходимо быстро перемещать в разные стороны через одинаковые промежутки времени. Для этого в исполнительном устройстве целесообразно установить ограничители хода плунжера.

При использовании колебаний типа «прямоугольная волна на выходе объекта возникают несинусоидальные колебания. Для определения значений $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ во входных и выходных колебаниях необходимо предварительно выделить первую или основную гармонику их разложения.

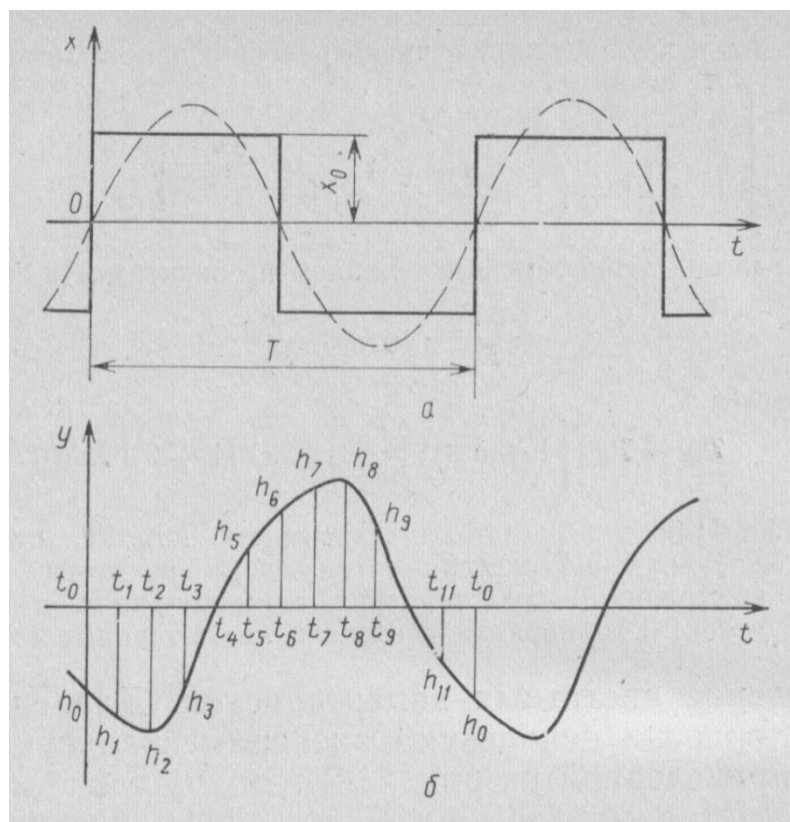


Рис. II-31. График изменения входной (а) и выходной (б) величин при снятии частотных характеристик объекта.

Разложение колебаний типа «прямоугольная волна» в ряд Фурье имеет вид

$$x = \frac{4x_0}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right) \quad (\text{II, 83})$$

где x_0 — амплитуда прямоугольного колебания; ω — угловая частота первой гармоники разложения, равная частоте прямоугольных колебаний. Все гармоники кроме основной интенсивно «подавляются» объектом, поэтому можно считать, что на его вход подаются гармонические колебания типа

$$x = \frac{4x_0}{\pi} \sin \omega t \quad (\text{II, 84})$$

На рис. II-31,а эти колебания показаны пунктиром.

Первую гармонику кривой выходных колебаний выделяют следующим образом. Период выходных колебаний разбивают на четное число равных частей (обычно 12) и из полученных точек $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{11}$ восставляют перпендикуляры $h_0, h_1, h_2, \dots, h_{11}$ до пересечения с кривой выходных колебаний. Начало периода (точка t_0) выбирают таким образом, чтобы первая гармоника входных колебаний имела нулевую фазу (рис. II-31,б).

Отношение амплитуд A выходной и входной основных гармоник и сдвиг фаз между ними φ находят по равенствам

$$A = \frac{A_y}{A_x} = \frac{\pi}{4x_0} \sqrt{a^2 + b^2} \quad (\text{II, 85})$$

$$\varphi = \arctg (a/b) \quad (\text{II, 86})$$

в которых

$$a = \frac{1}{6} [h_{10} - h_4 + 0.5(h_0 + h_8 - h_2 - h_6) + 0.866(h_{11} + h_9 - h_3 - h_5)]$$
$$b = \frac{1}{6} [h_1 - h_7 + 0.5(h_{11} + h_3 - h_5 - h_9) + 0.866(h_0 + h_2 - h_6 - h_8)]$$

Отметим, что в выходных колебаниях помимо гармонических составляющих может появиться постоянная C , обусловленная недостаточно точным воспроизведением прямоугольных колебаний на входе объекта. Она определяется по уравнению

$$C = \frac{1}{12} \sum_{k=0}^{11} h_k \quad (\text{II, 87})$$

Значения A и φ вычисляют для колебаний, полученных при всех w , и по ним строят АФХ объекта $W(im)>$ которую используют при анализе систем регулирования объекта.

Качественно свойства объекта можно определить по виду его АФХ. Объект устойчив, если при $w = 0$ его АФХ начинается на вещественной положительной полуоси; объект нейтрален, если при $w = 0$ его АФХ начинается на мнимой отрицательной полуоси в бесконечности.

Объект имеет 1-й порядок, если при изменении w от 0 до $+\infty$ его ФЧХ $\varphi(w)$, изменяясь в отрицательном направлении, не превышает значение ($-\pi/2$); объект имеет 2-й порядок, если его ФЧХ $\varphi(w)$ не превышает значения ($-\pi$), и т. д.

Объект обладает запаздыванием, если с возрастанием w до $+\infty$ его АФХ $W(iw)$ несколько раз охватывает начало координат в отрицательном направлении.

Экспериментальное определение частотных характеристик объектов требует дополнительной аппаратуры и большей затраты времени, чем в случае временных характеристик. Однако при этом более полно и достоверно выявляются динамические свойства объектов.

Наряду с описанными выше активными методами характеристики объектов химической технологии могут быть определены также пассивными методами. Последние применяют, когда на объекте не допускаются даже кратковременные отклонения от заданного режима эксплуатации. В подобном случае исходной информацией для определения характеристик является изменение входных и выходных величин объекта при его нормальной работе. Эти изменения представляют собой взаимозависимые случайные функции времени, по статистическим характеристикам которых можно определить статические и динамические характеристики объекта. Пассивные методы сложны, требуют очень большой затраты времени и тщательной постановки эксперимента. В промышленной практике они применяются довольно редко и поэтому здесь не рассматриваются.

Пользуясь аналогичными приемами, экспериментально определяют динамические характеристики не только объектов химической технологии, но и любых элементов АСР, в частности, автоматических регуляторов, систем регулирования в целом.

ГЛАВА III

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ, РЕГУЛЯТОРЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В настоящее время при разработке измерительных устройств, регуляторов и других средств автоматизации предусматривается их стандартизация в рамках Государственной системы приборов и средств автоматизации (ГСП).

ГСП представляет собой совокупность изделий, служащих для получения, обработки и использования информации; устройства ее предназначены для локальных АСР, АСУ ТП и т.д. Изделия ГСП строятся на основе базовых конструкций с унифицированными структурами, сигналами, источниками питания, конструктивными параметрами; это позволяет иметь общую технологическую базу для производства изделий, обеспечивает их взаимокomплектуемость и взаимозаменяемость, высокую точность, надежность и долговечность.

В ГСП стандартизованы параметры входных и выходных сигналов и источников энергии, элементы, блоки и модули приборов и устройств, их присоединительные, габаритные и монтажные размеры. В нормализованный ряд приборов и средств автоматизации входят первичные преобразователи и измерительные приборы, преобразователи для получения нормированных сигналов, регуляторы, вычислительные, функциональные и логические блоки, запоминающие устройства, вторичные приборы, цифро-печатающие устройства, исполнительные устройства и др.

По роду энергии, используемой для передачи информации и команд управления, в ГСП имеются три ветви:

электрическая — устройства которой обладают высокой точностью, быстродействием, обеспечивают большую дальность и емкость каналов передачи информации;

пневматическая — устройства которой характеризуются безопасностью работы в легковоспламеняющихся и взрывоопасных средах;

гидравлическая — устройства которой обеспечивают точные перемещения исполнительных органов и большие перестановочные усилия.

По функциональному признаку технические средства автоматизации подразделяются в ГСП на следующие группы:

средства получения информации о состоянии объекта;

средства преобразования, обработки, хранения информации и формирования команд управления;

устройства для использования командной информации с целью воздействия на технологический процесс;

средства преобразования информации для передачи по каналам связи.

Эти технические средства применяются для составления разнообразных систем автоматизации. Вследствие указанных выше особенностей в процессах химической технологии преимущественное распространение имеют приборы и средства автоматизации пневматической ветви ГСП.

1. Измерительные преобразователи и приборы

В системах автоматического управления для измерения (регистрации) текущих значений величин химико-технологических процессов используются различные измерительные устройства, к ним относятся измерительные приборы и измерительные преобразователи.

Под измерением понимают нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем называют измерительным прибором. Средство измерения, вырабатывающее сигнал в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не позволяющее наблюдателю осуществить непосредственное восприятие, называют измерительным преобразователем.

Кроме того, в измерительной технике часто используют понятия: первичный измерительный преобразователь, имея в виду тот, к которому подведена измеряемая величина, т. е. первый в измерительной цепи и передающий измерительный преобразователь, т. е. тот, который предназначен для дистанционной передачи сигнала измерительной информации.

По форме выхода все измерительные устройства делятся на аналоговые и цифровые.

В аналоговых измерительных устройствах выходом является непрерывная по значению удобоизмеряемая выходная величина. Обычно это перемещение указателя по шкале прибора или пера по диаграммной бумаге регистрирующего устройства. Аналоговая выходная величина удобна при визуальном отсчете и регистрации, однако ее передача, преобразование в документирование связаны с дополнительными погрешностями. В табл. III. 1 приведены наиболее употребительные аналоговые

Таблица III.1. Выходные сигналы измерительных преобразователей и измерительных устройств

Сигнал	Диапазон изменения
Электрический	
сила постоянного тока, мА	0—5; 0—20; 0—100
напряжение постоянного тока	0—20 мВ; 0—50 мВ; 0—100 мВ;
	0—1,0 В; 0—10 В
напряжение переменного тока, В	0,5—0—0,5; 1,0—0—1,0; 0—2,0
Пневматический	
давление газа, МПа (кгс/см ²)	0,02—0,1 (0,2—1,0)

выходные сигналы измерительных приборов и измерительных преобразователей.

В цифровых измерительных устройствах измерительная величина представляется в дискретной форме как окончательный результат измерения, выраженный числом или кодом. Благодаря ряду достоинств эти устройства получают все большее развитие. Они обладают высокой точностью, чувствительностью, быстродействием, не имеют погрешностей, связанных с субъективным отсчетом показаний, имеют кодированный выход, удобный для использования в измерительно-информационных системах и в вычислительной технике. Для индикации показаний (цифр от 0 до 9) в них используют в основном электрические, например, газоразрядные цифровые индикаторы — лампы, наполненные инертным газом.

Измерительные устройства могут иметь самостоятельное значение, когда они применяются только для текущего контроля технологических величин; их можно также использовать и в качестве элементов систем автоматического управления.

Вследствие несовершенства методов измерений и самих измерительных преобразователей получаемые результаты несвободны от искажений. Для определения точности измерений, т. е. их качества, отражающего близость результатов к истинному значению измеряемой величины, необходимо знать погрешность измерительного устройства при данном измерении.

Отклонение показаний измерительного устройства от истинного значения измеряемой величины характеризуется погрешностью его.

Для каждого средства измерения стандартами, техническими условиями и другими нормативными материалами устанавливаются нормальные условия применения, т. е. такие, при которых влияющие величины имеют нормальные значения или находятся в пределах нормальных значений. К таким влияющим величинам относятся температура и влажность окружающего воздуха, допустимые значения напряженности электрических и магнитных полей, колебания частоты и напряжения электропитания и т. п.

Погрешность средства измерения при нормальных условиях называют основной погрешностью; вследствие отклонения одной из влияющих величин от нормального значения или о выхода ее за пределы области нормальных значений возникает дополнительная погрешность.

Погрешности выражаются в виде абсолютных и относительных величин.

Разность между показанием измерительного прибора и истинным значением измеряемой величины есть абсолютная погрешность. Поскольку истинное значение нельзя установить, в измерительной технике используют

так называемое действительное значение, полученное посредством образцового прибора. Таким образом, абсолютная погрешность γ представляет собой разность

$$\gamma = A_{\text{и}} - A_{\text{д}} \quad (\text{III, 1})$$

где $A_{\text{и}}$ — показание измерительного прибора; $A_{\text{д}}$ — действительное значение измеряемой величины. Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой величины, т. е. является именованным числом.

Измерительный прибор характеризуется относительной погрешностью, определяемой по формуле

$$\beta = \frac{\gamma}{A_{\text{д}}} \cdot 100\% \approx \frac{\gamma}{A_{\text{и}}} \cdot 100\% \quad (\text{III, 2})$$

и приведенной - погрешностью, под которой понимают отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению N , выраженное в процентах

$$\beta_{\text{пр}} = \frac{\gamma}{N} \cdot 100\% \quad (\text{III, 3})$$

где N — нормирующее значение, которое условно может быть принято равным верхнему пределу измерений, диапазону измерений, длине шкалы и др. Для измерительных приборов с равномерной или степенной шкалой нормирующее значение принимается равным конечному значению рабочей части шкалы (нулевая отметка находится на краю или вне шкалы) или арифметической сумме конечных значений рабочей части шкалы без учета их знака (нулевая отметка находится внутри рабочей части шкалы).

Требования к точности средств измерений обусловлены задачами, для решения которых осуществляются измерения. Однако повышение точности (уменьшение погрешности) средства измерения, как правило, связано с усложнением его конструкции и увеличением стоимости. Для оценки точности работы средств измерений, предназначенных для различных целей (но не точности измерений, выполненных этими устройствами), установлены так называемые классы точности измерительной аппаратуры.

Класс точности средства измерения представляет собой его обобщенную характеристику, определяемую пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливают в стандартах на отдельные виды средств измерений. Обычно для технических измерительных устройств класс точности устанавливают по заранее заданной допускаемой основной приведенной погрешности. По ее величине измерительные устройства делят на классы точности от 0,05 до 4,0. В большинстве случаев класс точности выпускаемых промышленных приборов равен 0,5; 1,0; 1,5. Например, прибор класса точности 1,5 имеет максимально допускаемую основную приведенную погрешность $\pm 1,5\%$.

Класс точности прибора наносят на его шкалу.

Наряду с указанными величинами работа измерительного устройства характеризуется сходимостью измерений и чувствительностью. Сходимость измерений характеризует близость одних результатов измерений другим, выполняемым в тех же условиях. Чувствительность измерительного прибора S представляет собой отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора $\Delta X_{\text{вых}}$ к вызвавшему его изменению измеряемой величины $\Delta X_{\text{вх}}$:

$$S = \frac{\Delta x_{\text{вых}}}{\Delta x_{\text{вх}}} \quad (\text{III, 4})$$

Под порогом чувствительности понимают наименьшее изменение измеряемой величины, способное вызвать минимально измеряемое изменение показаний измерительного устройства.

От этих статических свойств существенно зависит точность получаемых результатов при использовании устройств.

Большое влияние на качество переходного процесса оказывают также и

динамические свойства измерительных устройств. Поведение измерительных устройств в динамическом режиме зависит от их внутренней структуры и входящих в них элементов и определяется инерционностью, запаздыванием, а также минимальным временем изменения выходной величины в пределах диапазона ее изменения. В случае, например, апериодического процесса инерционность характеризуется постоянной времени переходной характеристики. Запаздывание определяется промежутком времени от момента изменения измеряемой технологической величины до начала изменения выходной величины измерительного устройства.

По характеру динамических свойств измерительные устройства могут быть отнесены к тому или иному типу динамических звеньев.

Измерение температуры. В устройствах для измерения температуры обычно используют изменение какого-либо физического свойства тела, однозначно зависящего от его температуры и легко поддающегося измерению. К числу свойств, положенных в основу работы приборов для измерения температуры, относятся объемное расширение тел, изменение давления вещества в замкнутом объеме, возникновение термоэлектродвижущей силы, изменение электрического сопротивления проводников и полупроводников, интенсивность излучения нагретых тел и др.

Температурные шкалы. При измерении температуры используют две шкалы: термодинамическую, основанную на втором законе термодинамики и Международную практическую (МПТШ-68).

В термодинамической шкале температуру обозначают символом T и выражают в Кельвинах (К). Единицей измерения температуры (t) в Международной практической шкале служит градус ($^{\circ}\text{C}$), $1^{\circ}\text{C}=1\text{ К}$.

Количественно температуры в термодинамической и международной практической шкалах связаны соотношением

$$T[\text{К}] = t[^{\circ}\text{C}] + 273.15$$

Температуру измеряют с помощью термометров. В зависимости от физических свойств, на которых основано действие приборов для измерения температуры, различают: термометры расширения, манометрические термометры, термоэлектрические термометры, термометры сопротивления и пирометры излучения.

Термометры расширения построены на принципе изменения объема жидкости (жидкостные) или линейных размеров твердых тел (биметаллические и дилатометрические) при изменении температуры.

Действие жидкостных термометров основано на различии коэффициентов теплового расширения термометрического вещества (ртуть или спирт) и оболочки, в которой оно находится (термометрическое стекло или кварц). Такие термометры применяются для местных измерений температур в пределах от -190 до 600°C . Их основные достоинства — простота и высокая точность измерения, недостатки — невозможность ремонта,

отсутствие автоматической записи и передачи показаний на расстояние.

Работа биметаллических, а также dilatометрических термометров основана на различии «коэффициентов теплового расширения твердых тел, из которых выполнены чувствительные элементы. В биметаллических термометрах это пластина или спиральная лента, состоящая из двух слоев разнородных металлов; в dilatометрических — металлическая трубка и кварцевый или фарфоровый стержень. Пределы измерения таких термометров от —150 до +700 °С, погрешность 1—2%. Чаще всего они используются в качестве измерительных преобразователей АСР.

Манометрические термометры. Их действие основано на изменении давления жидкости (жидкостные), паро-жидкостной смеси (конденсационные) или газа (газовые), находящихся в замкнутом объеме, при изменении температуры. Они состоят из чувствительного элемента (термобаллон), соединительного капилляра и вторичного прибора — манометра. Класс точности манометрических термометров 1,0—2,5. Они используются для дистанционного (до 60 м) измерения температур в пределах от —160 до 600 °С. К их достоинствам относятся простота конструкции и обслуживания, возможность дистанционного измерения и автоматической записи показаний, к недостаткам — невысокая точность измерений, значительная инерционность, сравнительно небольшое расстояние дистанционной передачи показаний. .)

Термоэлектрические термометры состоят из термоэлектрического преобразователя (термопары), действие которого основано на использовании зависимости термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) термопары от температуры его рабочего спая, 'если температура свободного, спая постоянна, и вторичного прибора. При увеличении разности температур между рабочим и свободным спаями термопары величина ТЭДС возрастает. Наибольшее распространение получили следующие типы термоэлектрических преобразователей:

	Пределы измерения, °С
Платинородий-платинородиевые (ТПР)*	От 300 до +1600**
Платинородий-платиновые (ТПП)*	От 0 до +1300***
Хромель-алюмелевые (ТХА)* . . .	От —50 до +1000***
Хромель-копелевые (ТХК)*	От —50 до +600**
Вольфрамений-вольфрамениевые (ТВР):	
при длительном применении .	До 1800
при кратковременном применении	До 2500

* При длительном измерении.

** При кратковременном измерении может быть повышен на 200 °С.

*** То же, на 300 °С.

Для измерения ТЭДС в качестве вторичных приборов обычно применяют потенциометры или милливольтметры. В комплекте

с ними термоэлектрические термометры позволяют измерять и регистрировать температуру с высокой точностью и передавать показания на расстояние.

Термометры сопротивления состоят из термопреобразователя сопротивления, действие которого основано на использовании зависимости электрического сопротивления проводников или полупроводников от температуры и вторичного прибора. Изготавливаются металлические и полупроводниковые термометры сопротивления (термисторы).

К металлическим относятся платиновые термометры сопротивления (ТСП) и медные (ТСМ); они имеют следующие характеристики:

Градуйровка	Пределы измерения, °С
ТСП гр. 20 (при длительных измерениях)	От 0 до +650
ТСП гр. 21 и гр. 22	От —220 до +500
ТСМ гр. 23 и гр. 24	От —50 до +180

В качестве вторичных приборов в комплекте с термометрами сопротивления обычно применяются равновесные мосты и логометры.

Полупроводниковые термометры сопротивления изготавливаются из окислов различных металлов с добавками и используются для измерения температур в пределах от —90 до +180 °С. В отличие от металлических в этих термометрах происходит экспоненциальное уменьшение сопротивления при увеличении температуры, благодаря чему они обладают высокой чувствительностью. Однако изготавливать полупроводниковые термометры со строго одинаковыми характеристиками пока не удается, поэтому их градуировка индивидуальна. Чаще всего их используют в качестве чувствительных элементов различных автоматических устройств.

	Пределы измерения, °С
Пирометры частичного излучения (оптические)	От 700 до 6000
Пирометры полного излучения	От 100 до 2500
Пирометры спектрального отношения (цветовые)	От 1400 до 2800

При измерении пирометрами частичного и полного излучения необходимо вводить поправку на неполноту излучения (степень черноты) тела, температура которого измеряется. Пирометры излучения применяются для бесконтактного определения температуры тел. Погрешности пирометров излучения составляют 0,5—2%.

В химических производствах наибольшее распространение получили термометры расширения, термоэлектрические термометры и термометры сопротивления.

По сравнению с другими средствами автоматизации устройства для измерения температуры, как правило, обладают большей инерционностью и более значительным запаздыванием.

В качестве примера найдем динамические свойства термоэлектрического термометра, снабженного защитной арматурой, составив его уравнение динамики. Будем считать, что защитная арматура термометра обладает определенной емкостью и что температура горячего спая термометра T_{cn} равна температуре защитной арматуры.

Составим уравнение теплового баланса передачи тепла от измеряемой среды к термометру через защитную арматуру

$$cWdT_{cn} = qdt \quad (\text{III, 5})$$

где W — масса материала защитной арматуры, кг; c — удельная теплоемкость материала защитной арматуры, Дж/(кг*°C); q — тепловой поток от измеряемой среды к защитной арматуре, Вт.

Тепловой поток q можно представить следующим образом:

$$q = \alpha A(T - T_{cn}) \quad (\text{III, 6})$$

где A — поверхность нагрева защитной арматуры, м²; α — коэффициент теплоотдачи от измеряемой среды к защитной арматуре, Вт/(м²*°C); T — температура измеряемой среды, °C.

Решая совместно уравнения (III,5) и (III,6), получим

$$\frac{cW}{\alpha A} \cdot \frac{dT_{cn}}{dt} + T_{cn} = T$$

или в приращениях

$$\frac{cW}{\alpha A} \cdot \frac{d\Delta T_{cn}}{dt} + \Delta T_{cn} = \Delta T \quad (\text{III, 7})$$

Статическая характеристика термометра имеет вид

$$\Delta E = E - E_0 = \frac{dE}{dT_0} (T_{cn} - T_0) \quad (\text{III, 8})$$

где E и E_0 — соответственно текущее и произвольно выбранное базисное значения ТЭДС, мВ; T_0 — текущее значение температуры горячего спая термометра, °C, откуда

$$\Delta T_{cn} = \frac{dT_0}{dE} \Delta E \quad (\text{III, 9})$$

Подставив значение ΔT_{cn} из последнего равенства в уравнение (III,7), найдем

$$\frac{cW}{\alpha A} \cdot \frac{d\Delta E_{cn}}{dt} + \Delta E = \frac{dE}{dT_0} \Delta T \quad (\text{III, 10})$$

Введем обозначения

$$x_{BX} = \frac{\Delta T}{T_0} \quad x_{BYX} = \frac{\Delta E}{E_0}$$

Тогда уравнение (III,10) после преобразования будет иметь вид

$$\frac{cW}{\alpha A} \cdot \frac{dx_{BYX}}{dt} + x_{BYX} = \frac{dE}{dT_0} \cdot \frac{T_0}{E_0} x_{BX}$$

или окончательно

$$T \frac{dx_{BYX}}{dt} + x_{BYX} = kx_{BX} \quad (\text{III, 11})$$

$$T = \frac{cW}{\alpha A} \quad k = \frac{dE}{dT_0} \cdot \frac{T_0}{E_0}$$

Таким образом, в динамическом отношении термоэлектрический термометр представляет собой апериодическое звено 1-го порядка. Производную dE/dT_0 можно найти по градуировочным таблицам стандартных термометров, а их инерционность — по справочным данным по конструкциям термоэлектрических термометров.

Принципиальные схемы измерительных устройств для определения температуры и их уравнения динамики приведены в табл. III.2.

Измерение давления. Отношение силы равномерно распределенной по площади и нормальной к этой площади, характеризуется давлением.

Под абсолютным давлением в аппарате понимают полное давление жидкости или газа на его стенки; разность между ним ($P_{абс}$) и атмосферным давлением ($P_{атм}$) при $P_{абс} > P_{атм}$ называется избыточным давлением $P_{изб}$:

$$P_{изб} = P_{абс} - P_{атм}$$

а при $P_{абс} < P_{атм}$ — разрежением P_h :

$$P_h = P_{атм} - P_{абс}$$

В международной системе единиц (СИ) единицей давления является паскаль (Па). Еще не вышли из применения также следующие единицы: кгс/см²; мм вод. ст.; мм рт. ст. ($1 \text{ кгс/см}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$; $1 \text{ мм вод. ст.} = 9,8 \text{ Па}$; $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$).

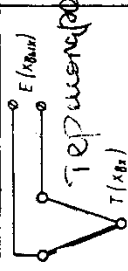
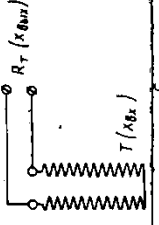
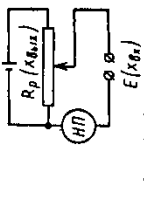
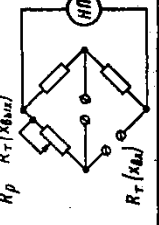
Для измерения давления используют манометры, а разности двух давлений — дифференциальные манометры.

По принципу действия приборы для измерения давлений делят на: жидкостные, деформационные, грузопоршневые и электрические.

Жидкостные манометры. В этих приборах измеряемое давление или разрежение уравнивается гидростатическим давлением столба рабочей жидкости, в качестве которой применяются ртуть, вода, спирт и др. Существует несколько конструктивно различных жидкостных приборов: двухтрубный U-образный манометр, однотрубный чашечный манометр и манометр с наклонной трубкой. Они используются для измерения давления при поверочных, наладочных и научно-исследовательских работах. Разновидностями жидкостных приборов являются поплавковый и колокольный манометры, позволяющие регистрировать и передавать показания на расстояние.

Деформационные манометры. В этих приборах измеряемое давление или разрежение уравнивается силами упругого противодействия различных чувствительных элементов (трубчатой пружины, мембраны, сильфона и т. п.), деформация которых, пропорциональная измеряемому параметру, посредством

Таблица III. Принципиальные схемы и уравнения динамики основных устройств для измерения температуры

Измерительный элемент	Схема измерительного элемента	Входная величина	Выходная величина	Уравнение динамики
Термометр расширения		Температура	Перемещение мениска рабочей жидкости в капилляре	$T \frac{dx_{Bx}}{dt} + x_{Bx} = k x_{Bx}$
Термоэлектрический термометр		То же	ТЭДС	То же
Термометр сопротивления		"	Изменение электрического сопротивления	То же
Компенсационная схема		ТЭДС	Изменение сопротивления резистора	$x_{Bx} = k x_{Bx}$
Уравновешенная мостовая схема		Изменение сопротивления одного из плеч моста	То же	То же

рычагов передается на стрелку или перо прибора. При снятии давления чувствительный элемент возвращается в первоначальное положение вследствие упругой деформации. Благодаря простоте и надежности конструкции, наглядности показаний, малым габаритам, высокой точности и широким пределам измерения деформационные манометры нашли широкое применение для измерения и регистрации давления и разрежения.

Грузопоршневые манометры. В этих приборах измеряемое давление определяется по величине нагрузки, действующей на поршень определенной площади. Грузопоршневые манометры имеют высокие классы точности: 0,02; 0,05 и 0,2 и широкий диапазон измерения: 0,1—250 МПа (1—2500 кгс/см²). Обычно они применяются для поверки манометров других видов.

Электрические манометры. Действие этих приборов основано на зависимости электрических параметров преобразователя давления от измеряемого давления. К ним относятся (пьезоэлектрические манометры, в которых используется зависимость электрического заряда пьезоэлемента от измеряемого давления; манометры сопротивления, основанные на зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента от измеряемого давления; ионизационные манометры, действие которых базируется на зависимости тока положительных ионов, образованных в результате ионизации молекул разреженного газа, от измеряемого давления. К последним относятся также радиоизотопные манометры, в которых для ионизации газа применяют излучение радиоизотопных источников.

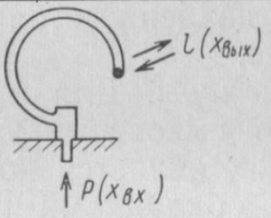
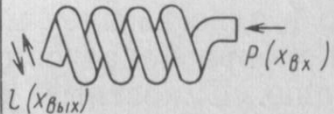
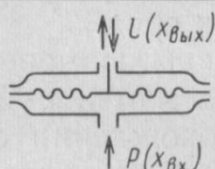
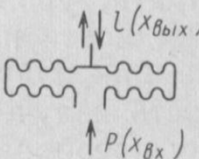
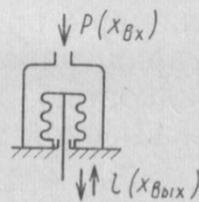
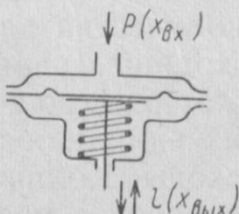
В настоящее время на предприятиях химической промышленности наибольшее распространение получили деформационные манометры. Принципиальные схемы и уравнения динамики деформационных измерительных преобразователей давления приведены в табл. III.3.

Измерение уровня жидкостей. Устройства для измерения уровня жидкости подразделяют на указательные стекла и поплавковые, гидростатические, электрические и радиоактивные уровнемеры.

Указательные стекла выполняют в виде стеклянной трубки, либо одной или нескольких камер с плоскими стеклами, соединенных с аппаратом. Указательные стекла применяются для местного измерения уровня в аппаратах, работающих при атмосферном или избыточном давлениях.

Поплавковые уровнемеры. В этих приборах чувствительным элементом является плавающий поплавок, плотность которого меньше плотности жидкости, или погружной поплавок, плотность которого больше, чем плотность жидкости. В первом из них поплавок следит за уровнем жидкости; второй работает по принципу изменения выталкивающей (архимедовой) силы, действующей на поплавок. В уровнемерах с погружным поплавком последний удерживается в подвешенном состоянии посредством пружинного элемента. Такие уровнемеры применяются для измерения уровня до 9 м.

Таблица III.3. Принципиальные схемы деформационных измерительных преобразователей; входные величины - давление, разрежение; уравнение динамики $x_{вых} = kx_{вх}$

Измерительный элемент	Схема измерительного элемента	Выходная величина
Одновитковая трубчатая пружина		Перемещение свободного конца пружины
Многовитковая трубчатая пружина		То же
Плоская упругая мембрана		Прогиб мембраны
Мембранная коробка		То же
Сильфон		Перемещение штока
Вялая мембрана с пружиной		То же

Гидростатические уровнемеры. Их действие основано на изменении гидростатического давления столба жидкости при изменении измеряемого уровня.

Различают два вида гидростатических уровнемеров:

пьезометрические и дифманометрические. Действие гидростатических пьезометрических уровнемеров основано на измерении давления воздуха или газа, барботирующего через слой жидкости, уровень которой измеряется.

Их часто применяют для определения уровня жидкостей, обладающих повышенной вязкостью. В гидростатических дифманометрических уровнемерах уровень жидкости определяется по перепаду давления столбов жидкости в аппарате и в уравнительном сосуде.

Электрические уровнемеры. Для измерения уровня жидких диэлектриков применяют емкостные уровнемеры. Чувствительным элементом последних является конденсатор, между вертикально установленными обкладками которого находится жидкость. При изменении уровня жидкости изменяется емкость конденсатора, включенного в одно из плеч моста переменного тока, и на вход вторичного прибора подается сигнал, пропорциональный измеряемому уровню. Емкостные уровнемеры применяют для измерения уровня жидких (за исключением вязких и кристаллизующихся) и сыпучих сред.

Радиоактивные уровнемеры. Измерение уровня жидкости этими приборами основано на изменении интенсивности радиоактивного излучения при прохождении его через слой жидкости. Источник и приемник излучения располагаются снаружи, с противоположных сторон аппарата, уровень жидкости в которых измеряется. Если уровень жидкости находится ниже линии, соединяющей источник и приемник излучения, то последний фиксирует большую интенсивность излучения, и наоборот. Изменение интенсивности излучения преобразуется в электронном блоке в электрический сигнал, который измеряется вторичным прибором. Радиоактивные уровнемеры применяются для измерения уровня в закрытых резервуарах, заполненных агрессивной или легковоспламеняющейся жидкостью, а также жидкостью под высоким давлением или при высокой температуре (расплавленные металлы).

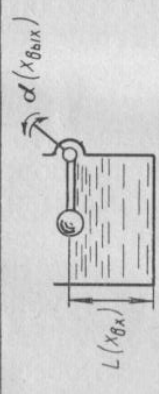
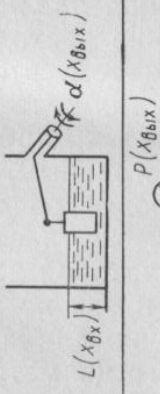
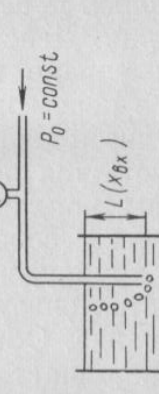
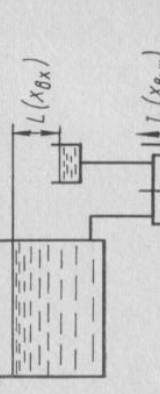
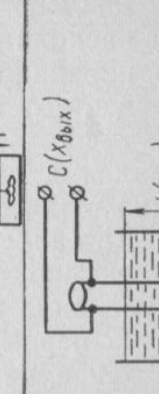
Принципиальные схемы основных измерительных преобразователей уровня и их уравнивания динамики приведены в табл. III.4.

Измерение расхода и количества вещества. Количество жидкости, газа или пара, проходящее через данное сечение канала в единицу времени называют расходом этого вещества. В зависимости от того, в каких единицах он измеряется различают объемный и массовый расходы. Количество вещества измеряют счетчиками количества, а расход — расходомерами.

В химической промышленности наиболее часто применяют расходомеры следующих типов: переменного перепада давления, постоянного перепада давления, переменного уровня и электромагнитные.

Расходомеры переменного перепада давления основаны на том, что расход вещества зависит от перепада давления, создаваемого неподвижным устройством, установленным в трубопроводе, или элементом трубопровода. К этой группе относятся расходомеры с сужающим устройством, с напорным устройством и др.

Таблица III.4. Принципиальные схемы и уравнения динамики измерительных преобразователей; входная величина - уровень

Измерительный элемент	Схема измерительного элемента	Выходная величина	Уравнение динамики
Уровеньмер с плавучим поплавком		Угол поворота оси	$x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}$
Уровеньмер с погружным поплавком		Угол скручивания торсионной трубки	$x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}$
Гидростатический пьезоэлектрический уровеньмер		Изменение давления баротрибунного газа	$T \frac{d x_{\text{вых}}}{d t} + x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}$
Гидростатический дифференциальный уровеньмер		Перемещение штока дифференциального метра	$T_1^2 \frac{d^2 x_{\text{вых}}}{d t^2} + T_2 \frac{d x_{\text{вых}}}{d t} + x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}$
Электрический уровеньмер		Изменение емкости конденсатора, включенного в мостовую схему	$x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}$

Расходомер с сужающим устройством. Его действие базируется на том, что расход зависит от перепада давления, образующегося в сужающем устройстве в результате частичного перехода потенциальной энергии потока в кинетическую. Такой расходомер состоит из установленного в трубопроводе сужающего устройства, перепад давления на котором посредством импульсных соединительных трубок передается на дифманометр и далее на вторичный прибор. Расходомеры этого типа позволяют измерять расходы жидкости, газа и пара в широких пределах при различных температурах и давлениях, а также обеспечивают относительно высокую точность измерения, регистрацию показаний и их передачу на расстояние.

Расходомер с напорным устройством. Его действие базируется на том, что расход зависит от перепада давления, создаваемого напорным устройством в результате перехода кинетической энергии струи в потенциальную. Напорная трубка расходомера, располагаемая по оси трубопровода навстречу потоку, воспринимает полный и статический напоры, разность которых (динамический напор) измеряется посредством дифманометра. Расходомеры с напорным устройством применяются для измерения расхода жидкостей и газов в трубопроводах больших диаметров и при больших скоростях потоков, а также в трубопроводах некруглого сечения.

Расходомеры постоянного перепада давления входят в группу расходомеров обтекания. Действие расходомеров постоянного перепада давления основано на том, что расход вещества зависит от вертикального перемещения тела, изменяющего площадь проходного отверстия прибора таким образом, что перепад давления на поплавке остается постоянным. К приборам этого типа относятся ротаметры, поплавковые расходомеры и др.

Ротаметр представляет собой вертикальную коническую, расширяющуюся сверху трубку, в которой находится поплавок. Изменение подачи вещества снизу вверх по этой трубке приводит к перемещению поплавка. Обычно длина трубки ротаметра не менее, чем в 10 раз превышает его диаметр, что обеспечивает значительный ход поплавка. При этом поплавок или связанный с ним стержень позволяют осуществлять наблюдения.

Поплавковый расходомер имеет поплавок конической формы, который вертикально перемещается внутри отверстия на небольшое расстояние (не более диаметра поплавка). Расходомеры снабжаются дистанционной передачей показаний.

Расходомеры постоянного перепада давления имеют большие пределы измерений, позволяют измерять также и малые расходы, обладают небольшими безвозвратными потерями, постоянными во всем диапазоне измерения, имеют относительную равномерную шкалу, но требуют индивидуальной градуировки.

Расходомеры переменного уровня. Действие этих приборов основано на том, что расход зависит от высоты уровня жидкости в сосуде при свободном истечении ее через отверстие в дне или боковой стенке сосуда. Они состоят из приемника—цилиндрического или прямоугольного сосуда с круглым отверстием для истечения (диафрагмой) в его дне, либо с щелевым отверстием для истечения в боковой поверхности сосуда — и любого стандартного измерителя уровня. Расходомеры переменного уровня применяются для измерения небольших расходов агрессивных жидкостей, пульсирующих жидкостных потоков, а также газожидкостных смесей, находящихся при атмосферном давлении.

Электромагнитные расходомеры. Их действие базируется на зависимости ЭДС, индуцируемой в потоке электропроводной жидкости, проходящей через однородное магнитное поле, от средней скорости потока. Они используются для измерения расхода электропроводной жидкости (проводимостью выше $10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$), протекающей по трубопроводу, расположенному между полюсами магнита. Направления потока жидкости и силовых линий магнитного поля взаимно перпендикулярны.

Ионы жидкости перемещаются под действием магнитного поля и отдают свои заряды измерительным электродам, создавая на них ЭДС, пропорциональную скорости течения жидкости и, следовательно, ее расходу. Наводимая ЭДС измеряется вторичным прибором.

Принципиальные схемы устройств для измерения расхода приведены в табл. III.5, а схемы дифманометров и их уравнения динамики — в табл. III.6.

Измерение состава, концентрации и т. п. Для определения физико-химических параметров веществ в настоящее время применяют, как правило, косвенные методы анализа. Последние основаны на использовании известных взаимосвязей между искомыми параметрами и каким-либо физическим или физико-химическим свойством вещества, при условии, что это свойство, может быть измерено, а компонент, концентрация которого измеряется, в достаточной степени отличается от остальных компонентов смеси, хотя бы по одному физико-химическому свойству.

Вследствие значительного числа компонентов, концентрации которых подлежат измерению, большого различия в их физико-химических свойствах и еще большего разнообразия сложных смесей разработаны многочисленные методы их анализа. В основу работы каждого анализатора положены особенности, связанные со спецификой измеряемого компонента. Поэтому они не являются универсальными приборами и могут эксплуатироваться только в условиях, для которых они предназначены.

При автоматическом контроле физико-химических параметров веществ получили распространение следующие методы анализа:

Таблица III.5. Принципиальные схемы и уравнения динамики измерительных устройств; входная величина - расход; уравнение динамики $x_{\text{вых}} = k$

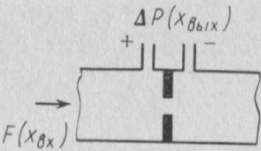
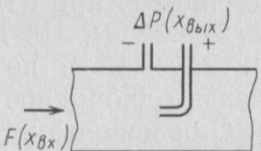
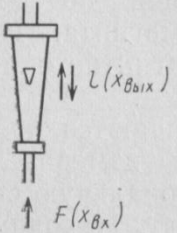
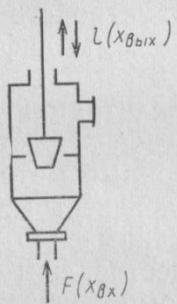
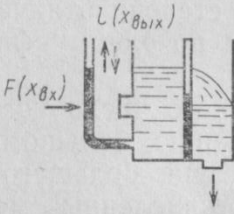
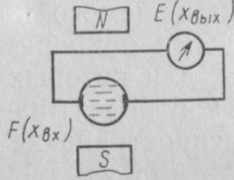
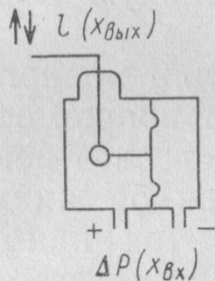
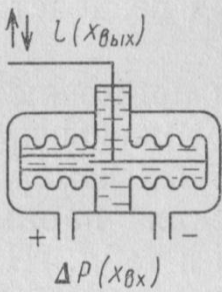
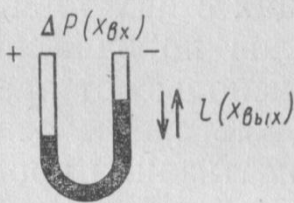
Измерительный элемент	Схема измерительного элемента	Выходная величина
Сужающее устройство (диафрагма, сопло, сопло Вентури)		Перепад давления на сужающем устройстве
Напорное устройство		Динамический напор
Ротаметр		Перемещение поплавка
Поплавковый расходомер		Перемещение штока
Расходомер переменного уровня		Изменение уровня жидкости
Электромагнитный расходомер		ЭДС

Таблица III.6. Принципиальные схемы и уравнения динамики дифманометров; входная величина - перепад давления

Измерительный элемент	Схема измерительного элемента	Выходная величина	Уравнение динамики
Дифманометр мембранный		Перемещение рычага	$x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}$
Дифманометр сильфонный		То же	То же
U-образный дифманометр		Изменение уровня рабочей жидкости в U-образной трубке	$T_1^2 \frac{d^2 x_{\text{вых}}}{dt^2} + T_2 \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}$

кондуктометрический, основанный на измерении концентрации растворов электролитов по их удельной электропроводности;

потенциометрический, предназначенный для растворов электролитов и основанный на измерении электродных потенциалов — разности потенциалов, возникающей на границе раствора и электрода, погруженного в этот раствор;

оптические методы, в которых используются поглощение, преломление и отражение электромагнитных волн различных областей спектра отдельными компонентами сложного вещества; различают спектральный, инфракрасный, микроволновый и колориметрический анализы;

электрохимический, который основан на различных электрохимических свойствах отдельных компонентов сложной смеси; различают электрометрический и полярографический методы анализа.

К приборам для определения состава газовой смеси относятся химические и физические газоанализаторы, хроматографы и масс-спектрометры.

Химические газоанализаторы. Действие этих приборов основано

на измерении изменения объема в результате поглощения одного или нескольких компонентов газовой смеси каким-либо веществом, вступающим с ними в химическое соединение.

Физические газоанализаторы. В этих приборах для анализа газовой смеси используется какое-либо физическое свойство смеси, изменяющееся в зависимости от содержания в ней определенного компонента. В качестве такого свойства можно выбрать теплопроводность, поглотительную способность газов, их магнитную проницаемость и т. д.

Хроматографы предназначены для полного анализа жидких и газовых смесей. Действие этих приборов основано на различной способности веществ адсорбироваться неподвижной твердой фазой или растворяться в неподвижной жидкой фазе.

Масс-спектрометры. Действие этих приборов основано на разделении анализируемого газа по массам атомов и молекул составляющих его компонентов под воздействием электрических и магнитных полей.

В химической промышленности применяются также анализаторы, в основу работы которых положены другие методы.

Принципиальные схемы некоторых измерительных устройств для определения физико-химических параметров веществ и уравнения их динамики приведены в табл. III.7.

Преобразователи. В автоматических системах управления для взаимного согласования входящих в них элементов, обеспечения дистанционной передачи сигналов по каналам связи, удобства регистрации показаний и т. п. используют преобразователи сигналов и энергии. Принципиальные схемы основных преобразователей, применяемых при автоматизации процессов химической технологии, приведены ниже.

Пневматический унифицированный измерительный преобразователь (рис. III-1а) предназначен для непрерывного преобразования давления (разрежения), перепада давления, расхода, температуры, а также уровня и плотности жидкостей в унифицированный пневматический сигнал дистанционной передачи. Принцип его действия основан на пневматической силовой компенсации. Измеряемая величина воздействует на чувствительный элемент и преобразуется в силу, которая автоматически уравнивается усилием, развиваемым давлением воздуха в сильфоне обратной связи. Это давление $P_{\text{вых}} = 0,02—0,1 \text{ МПа}$ ($0,2—1 \text{ кгс/см}^2$) является выходным сигналом преобразователя.

Электрический унифицированный измерительный преобразователь (рис. III-1,б) предназначен для непрерывного преобразования тех же величин, что и преобразователь, показанный на рис. III-1,а, в электрический токовый сигнал дистанционной передачи. В преобразователе используется принцип электрической силовой компенсации. Измерительная величина, воздействуя на чувствительный элемент, через рычажную систему приводит к незначительному перемещению управляющего флажка индикатора рассогласования дифференциально-трансформаторного типа.

Таблица III.7. Принципиальные схемы и уравнения динамики измерительных устройств для определения физико-химических параметров веществ

Измерительный элемент	Схема измерительного элемента	Входная величина	Выходная величина	Уравнение динамики
pH-метр		pH раствора	ЭДС	$x_{вix} = k x_{вх}$
Кондуктометр		Концентрация раствора	Разбаланс мостовой схемы	То же
Термомгнитный газоанализатор		Концентрация кислорода	То же	$T \frac{dx_{вix}}{dt} + x_{вix} = k x_{вх}$
Термокондуктометрический газоанализатор		Концентрация газа	ЭДС	То же

Последний преобразует это перемещение в управляющий сигнал переменного тока, поступающий на вход электронного усилителя. На выходе усилителя сигнал постоянного тока поступает в катушку силового устройства и одновременно в последовательно соединенную с ней линию дистанционной передачи. Выходной сигнал преобразователя I может быть равен 0—5; 0—20 мА.

Преобразователь ТЭДС термоэлектрических термометров в унифицированный токовый сигнал (рис. III-2, а) состоит из измерительного моста и усилителя, охваченного обратной связью по выходному току. Ток, протекающий через внешнюю нагрузку, пропорционален выходному напряжению. Падение напряжения при протекании этого тока через резистор обратной связи уравнивает напряжение на выходе измерительного моста.

Преобразователь работает с термоэлектрическими термометрами стандартных градуировок. Выходной сигнал преобразователя $I = 0—5$ мА.

Преобразователь для термометров сопротивления (рис. III-2, б) работает в комплекте с платиновыми и медными термометрами сопротивления, изменение сопротивления которых он преобразует в унифицированный токовый сигнал. Преобразователь состоит из измерительного моста и усилителя, охваченного отрицательной обратной связью по выходному току. Выходной сигнал преобразователя $I = 0—5$ мА.

Электронепневматический преобразователь (рис. III-2, в) непрерывного унифицированного сигнала постоянного тока выдает на выходе пневматический унифицированный сигнал. Действие прибора основано на преобразовании тока в пропорциональное усилие при помощи магнитоэлектрического механизма. Это усилие измеряется методом компенсации сил благодаря пневматической системе сопло — заслонка, снабженной сильфонной жесткой обратной связью. В схемах измерения и регулирования

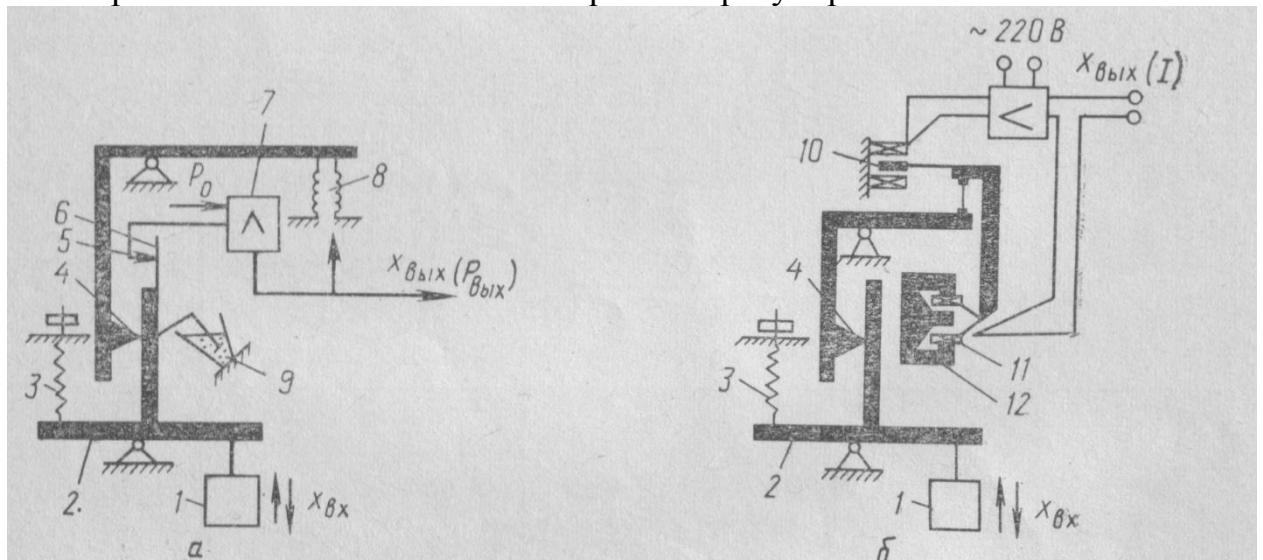


Рис. III-1. Принципиальные схемы пневматического (а) и электрического (б) унифицированных измерительных преобразователей:

1 — чувствительный элемент; 2 — рычаги передаточного механизма; 3 — корректор нуля; 4 — подвижная опора; 5 — сопло; 6 — заслонка; 7 — усилитель; 8 — сильфон; 9 — демпфер; 10 — флажок индикатора; 11 — катушка; 12 — постоянный магнит.

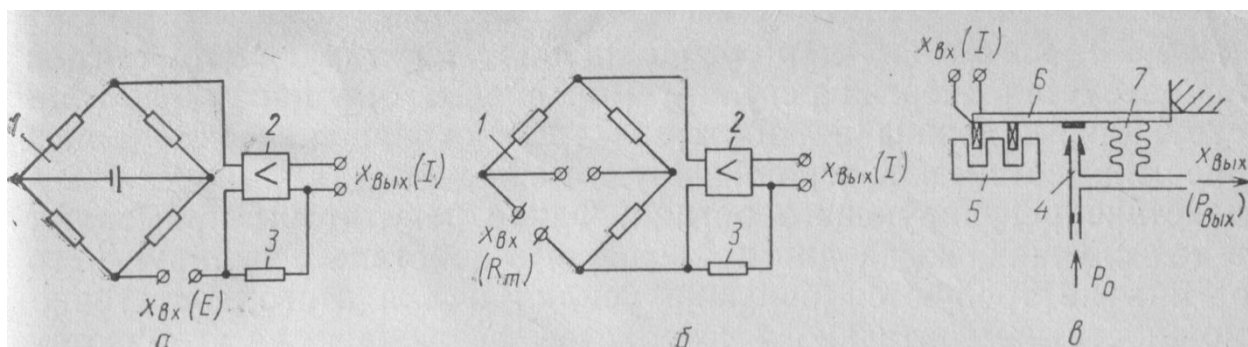


Рис. III-2. Принципиальные схемы преобразователей ТЭДС (а) и сопротивления (б) в токовый сигнал и электропневмопреобразователя (в): 1 — измерительный мост; 2 — усилитель; 3 — резистор обратной связи; 4 — система сопло-заслонка; 5 — магнитоэлектрический механизм; 6 — рычаг; 7 — сильфон обратной связи.

температуры электропневматический преобразователь работает в комплекте с описанными выше преобразователями для термоэлектрических термометров или термометров сопротивления, выдающими унифицированный токовый сигнал. Входной сигнал преобразователя $I = 0—5$ мА, выходной сигнал преобразователя $P_{\text{вых}} = 0,02—0,1$ МПа ($0,2—1$ кгс/см²).

2. Автоматические регуляторы

Устройство, с помощью которого в системах регулирования обеспечивается автоматическое поддержание технологической величины около заданного значения, называют автоматическим регулятором. Регулятор является одним из элементов замкнутой системы.

На вход автоматического регулятора подаются текущее y_m и заданное u_z значения регулируемой величины. Рассогласование между ними $y_m—u_z$ приводит к изменению выходной величины регулятора x_p

$$x_p = f(y_m - u_z)$$

Эту зависимость в относительных величинах (при $u = 0$)

$$x = f(y) \quad (\text{III, 12})$$

называют законом регулирования. Каждый конкретный регулятор имеет свой закон регулирования.

Классификация регуляторов. Регуляторы классифицируют по нескольким признакам (наличие подводимой энергии, вид используемой энергии, вид регулируемой величины, характер действия, характер регулирующего воздействия, закон регулирования).

По наличию подводимой энергии регуляторы подразделяют на не имеющие вспомогательный источник энергии и имеющие таковой. У регуляторов без вспомогательного

источника энергии для перемещения регулирующего органа используется энергия регулируемой среды. Они просты по конструкции, надежны в работе, не требуют внешних источников энергии, но имеют ограниченную мощность для приведения в действие регулирующего органа. Такие регуляторы применяют в тех случаях, когда для приведения в действие регулирующего органа не требуются большие усилия и для этого достаточно мощности измерительного устройства, а также, если к качеству переходного процесса не предъявляются жесткие требования.

У регуляторов с вспомогательным источником энергии перемещение регулирующего органа осуществляется дополнительным приводом, работающим от внешнего источника. Они требуют дополнительной внешней энергии и имеют более сложную конструкцию. Эти регуляторы способны обеспечить высокое качество регулирования.

По виду используемой энергии регуляторы делят на гидравлические, электрические и пневматические.

В гидравлических регуляторах для перемещения регулирующего органа используется энергия жидкости (обычно трансформаторного масла) под давлением 0,6—0,8 МПа (6—8 кгс/см²), в электрических — электрическая энергия промышленной частоты, в пневматических — энергия сжатого воздуха давлением 0,14 МПа (1,4 кгс/см²).

При автоматизации химических производств наибольшее распространение получили пневматические регуляторы, вследствие их взрыво- и пожаробезопасности, надежности в работе, развития довольно больших перестановочных усилий (до нескольких сотен килограмм). Не препятствует их использованию присущая им инерционность (в отдельных случаях время прохождения сигнала может достигать нескольких десятков секунд) и ограниченная дальность действия (до ~300 м). Это объясняется тем, что большинство технологических величин изменяется довольно медленно, вследствие чего скорость срабатывания пневматических регуляторов оказывается приемлемой. В случае централизованного управления в пределах цеха или даже производства химического предприятия дальность действия пневматических регуляторов также вполне достаточна (при установке дополнительных усилителей).

По виду регулируемой величины различают регуляторы температуры, давления, расхода, уровня, концентрации и других величин.

По характеру действия регуляторы подразделяются на имеющие прямую и обратную характеристики. У первых из них возрастание входного сигнала обуславливает увеличение выходной величины, а у вторых — наоборот.

По характеру регулирующего воздействия можно выделить регуляторы прерывистого и непрерывного действия. У регуляторов прерывистого действия непрерывному изменению входной величины соответствует прерывистое изменение регулирующего воз

действия хотя бы в одном из элементов регулятора, существенным образом влияющее на работу регулятора в целом. В свою очередь они делятся на позиционные, а также импульсные. У регуляторов непрерывного действия непрерывному изменению входной величины соответствует непрерывное изменение его выходной величины.

По закону регулирования регуляторы непрерывного действия делят на интегральные, пропорциональные, пропорционально-интегральные, пропорционально-дифференциальные и пропорционально – интегрально - дифференциальные. В настоящее время при автоматизации химических предприятий используются позиционные регуляторы и в большей мере регуляторы непрерывного действия.

Ниже рассмотрены регуляторы этих типов в случае, когда они имеют прямую характеристику.

Позиционные регуляторы (Пз-регуляторы). Позиционными, или релейными, называют регуляторы, у которых при изменении на входе выходная величина может принимать только определенные, заранее известные значения. Переход от одного из этих значений к другому происходит очень быстро, практически мгновенно. Они просты по конструкции, надежны в работе, несложны в обслуживании и при настройке.

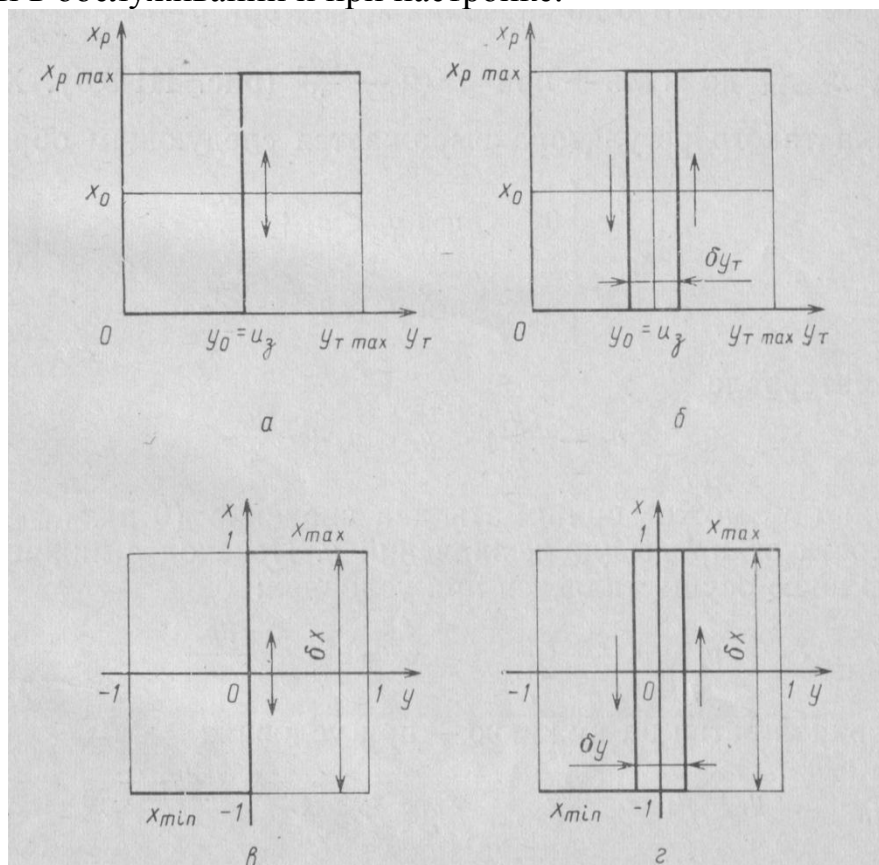


Рис. III-3. Статические характеристики идеального Пз-регулятора (а, в) и Пз-регулятора с зоной нечувствительности (б, г), настроенных на максимум, в абсолютных (а, б) и относительных (в, г) величинах.

Наибольшее распространение получили двухпозиционные регуляторы, у которых выходная величина может принимать только два значения: минимальное или максимальное. Иногда такие регуляторы называют регуляторами типа «открыто» — «закрыто».

Статические характеристики идеального двухпозиционного регулятора и регулятора с зоной нечувствительности (т. е. при неоднозначной характеристике) приведены на рис. III-3. Если текущее значение входной величины идеального регулятора y_m меньше заданного $u_3 = y_0$, то его выходная величина x_p принимает минимальное значение, равное нулю. Если же $y_m > u_3$, то выходная величина x_p принимает максимальное значение $x_{p, \max}$ (рис. III-3, а). При изменении текущего значения регулируемой величины в момент перехода им заданного значения выходная величина ПЗ-регулятора быстро изменяется от одного крайнего положения до другого. Таким образом, работа идеального (с однозначной характеристикой) ПЗ-регулятора может быть представлена в виде:

$$x_p = \begin{cases} 0, & \text{при } y_T < u_3 \\ x_{p, \max} & \text{при } y_T > u_3 \end{cases}$$

У регулятора с зоной нечувствительности выходная величина x изменяется от 0 до значения $x_{p, \max}$ при $y = u_3 + \delta y_t / 2$ и от значения $x_{p, \max}$ до нуля — при $y = u_3 - \delta y_t / 2$ (рис. 7III-3, б). Характеристика такого регулятора выражается следующим образом

$$x_p = \begin{cases} 0, & \text{при } y_T < u_3 + \frac{\delta y_T}{2} \\ x_{p, \max} & \text{при } y_T > u_3 - \frac{\delta y_T}{2} \end{cases} \quad (\text{III, 13.а})$$

В интервале

$$u_3 - \frac{\delta y_T}{2} < y_T < u_3 + \frac{\delta y_T}{2}$$

величина x_p может принимать два значения (0 и $x_{p, \max}$) в зависимости от предыдущих значений y . Переход с нижней ветви на верхнюю осуществляется при условиях:

$$y_T = u_3 + \frac{\delta y_T}{2} \quad x_p = 0 \quad \frac{dy_T}{dt} > 0$$

а с верхней ветви на нижнюю — при условиях

$$y_T = u_3 - \frac{\delta y_T}{2} \quad x_p = x_{p, \max} \quad \frac{dy_T}{dt} < 0$$

На рис. III-3, в и г показаны статические характеристики тех же регуляторов в относительных величинах. Для идеального

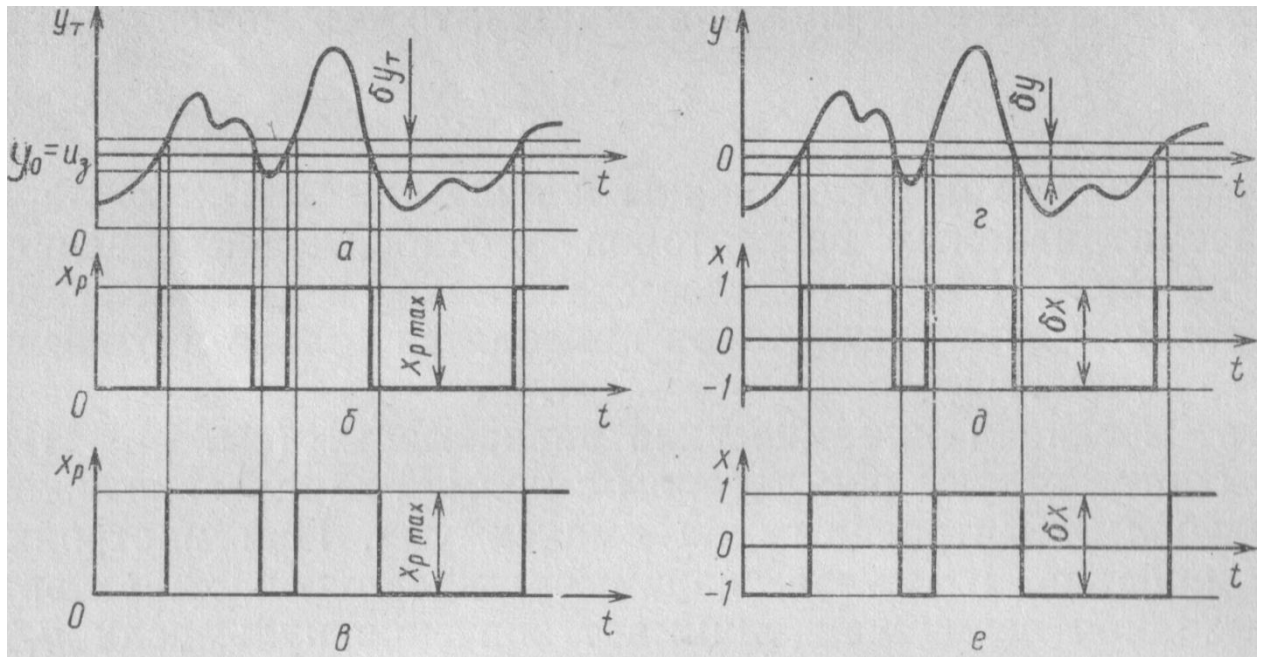


Рис. III-4. График изменения входной величины ПЗ-регулятора (а, з) выходных величин идеального ПЗ-регулятора (б, д) и ПЗ-регулятора с зоной нечувствительности (в, е) в абсолютных (а, б, в) и относительных (з, д, е) величинах.

регулятора они могут быть записаны в виде:

$$x = \begin{cases} -1, & y < 0 \\ 1, & y > 0 \end{cases} \quad (\text{III, 13.б})$$

а для регулятора с зоной нечувствительности

$$x_p = \begin{cases} 1 & , \text{ при } y < \frac{\delta y}{2} \\ -1 & \text{ при } y > -\frac{\delta y}{2} \end{cases} \quad (\text{III, 13.в})$$

Условие перехода x снизу вверх принимает вид

$$y = +\frac{\delta y}{2} \quad x = -1 \quad \frac{dy}{dt} > 0$$

а сверху вниз

$$y = -\frac{\delta y}{2} \quad x = 1 \quad \frac{dy}{dt} < 0$$

При непрерывном произвольном изменении технологической величины y_m (рис. III-4, а) выходная величина x_p ПЗ-регулятора с идеальной статической характеристикой принимает другое значение только при переходе y_m заданного значения u_3 , т. е. в момент изменения знака отклонения $y_m - u_3$. ПЗ-регулятор не учитывает, удаляется ли регулируемая величина от заданного значения или приближается к нему, а также изменяется ли она с большой или малой скоростью (рис. III-4, б).

При непрерывном возрастании входной величины выходная величина ПЗ-регулятора с зоной нечувствительности (рис. III-4, в) принимает другое значение в момент, когда

$$y_T = u_3 + \frac{\delta y_T}{2}$$

если же входная величина понижается, то — в момент, когда

$$y_T = u_3 - \frac{\delta y_T}{2}$$

Изменение входной величины и динамические характеристики рассматриваемых регуляторов в относительных величинах даны на рис. III-4, *з*—*е*. Далее статические и динамические характеристики всех регуляторов приводятся только в относительных величинах.

Статические и динамические зависимости (см. рис. III-3 и III-4) соответствуют регуляторам с прямой характеристикой или регуляторам, настроенным по «максимум». При настройке их на «минимум», в случае, например, идеальной характеристики, выходная величина принимает значение нуля, если $y_m > u_3$, и значение $x_{p \max}$, если $y_m < u_3$. Статическая характеристика такого регулятора в относительных величинах записывается следующим образом:

$$x = \begin{cases} -1 & \text{при } y < 0 \\ 1 & \text{при } y > 0 \end{cases} \quad (\text{III, 13.г})$$

Примерами ПЗ-регуляторов или двухпозиционных устройств могут служить электроконтактный термометр, биметаллический сигнализатор температуры, электроконтактный манометр, пневматическое реле и др.

Работа ПЗ-регуляторов в замкнутом контуре регулирования рассмотрена в гл. VI.

Интегральные регуляторы (И-регуляторы). К ним относятся те, у которых изменение выходной величины x пропорционально интегралу отклонения входной величины y от заданного значения u по времени. Уравнение динамики И-регулятора имеет вид

$$x = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t y dt \quad (\text{III, 14})$$

где $T_{\text{и}}$ — время интегрирования регулятора или время изменения его выходной величины на 1% при отклонении входной величины от заданного значения на 1% максимально возможного отклонения. Время $T_{\text{и}}$ — настроечный параметр И-регулятора. С увеличением $T_{\text{и}}$ воздействие входной величины регулятора на выходную ослабевает.

Переходная характеристика И-регулятора имеет вид

$$h(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} t \quad (\text{III, 15})$$

Это уравнение наклонной прямой. Переходные характеристики И-регулятора при двух различных значениях времени интегрирования приведены на рис. III-5. В обоих случаях угол наклона переходных характеристик не изменяется во времени. Для нахождения времени интегрирования $T_{\text{и}}$ по переходной характеристике на поле чертежа наносят единичное ступенчатое

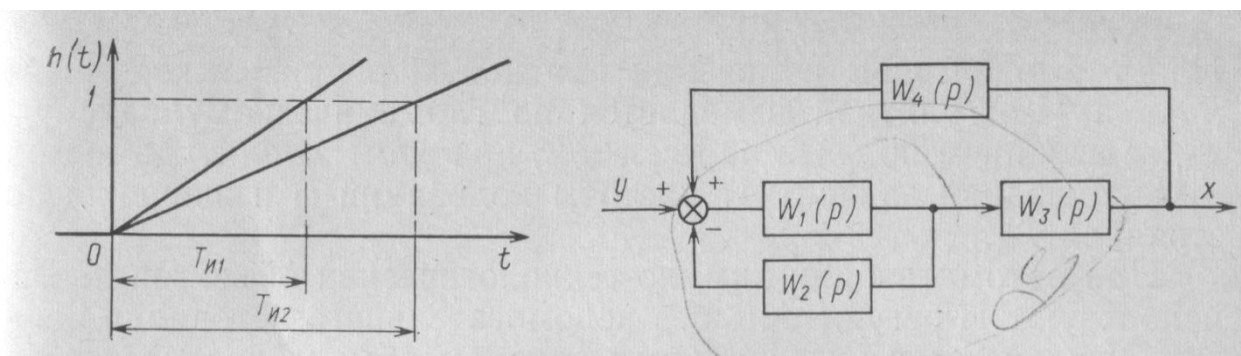


Рис. III-5. Переходные характеристики И-регулятора при разных значениях времени интегрирования.

Рис. III-6. Структурная схема И-составляющей промышленных регуляторов.

изменение величины в том же масштабе. Координата точки пересечения этих характеристик по оси абсцисс определяет величину времени интегрирования.

В динамическом отношении И-регулятор представляет собой интегрирующее звено с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{T_{и}p} \quad (\text{III, 16})$$

Пример структурной схемы части промышленного регулятора, отрабатывающего

И-составляющую закона регулирования, приведен на рис. III-6. Передаточные функции звеньев этой схемы определяются следующими выражениями:

$$W_1(p) = k \gg 1 \quad W_2(p) = 1 \quad W_3(p) = \frac{1}{T_{и}p+1} \quad W_4(p) = 1 \quad (\text{III, 17})$$

Передаточная функция всей схемы находится по равенству

$$W(p) = \frac{W_1(p)W_3(p)}{1+W_1(p)W_2(p)-W_1(p)W_3(p)W_4(p)} \quad (\text{III, 18})$$

Подставим в равенство (III,18) значения из выражений (III,17)

$$W(p) = \frac{k \frac{1}{T_{и}p+1}}{1+k-k \frac{1}{T_{и}p+1}}$$

Разделим числитель и знаменатель полученной дроби на k и, пренебрегая в знаменателе слагаемым 1/k, окончательно получим

$$W(p) = \frac{\frac{1}{T_{и}p+1}}{1-\frac{1}{T_{и}p+1}} = \frac{1}{T_{и}p} \quad (\text{III, 19})$$

что соответствует передаточной функции И-регулятора.

Амплитудно-фазовая характеристика И-регулятора определяется зависимостью

$$W(i\omega) = \frac{1}{T_{и}\omega} e^{-i\frac{\pi}{2}} \quad (\text{III, 20})$$

При гармоническом изменении входной величины выходная величина И-регулятора изменяется по гармоническому закону с запаздыванием по фазе на угол $\pi/2$; при этом амплитуда выходных колебаний зависит от частоты колебаний ω и значения постоянной T_u .

При автоматизации химико-технологических объектов иногда используют И-регуляторы без вспомогательного источника энергии. Устройства с интегральным законом обычно вводятся в более сложные законы регулирования в качестве одной из составляющих.

Пропорциональные регуляторы (П-регуляторы). К ним относятся те, у которых выходная величина в пределах зоны регулирования изменяется пропорционально изменению входной величины.

Уравнение динамики П-регулятора имеет вид

$$x = k_p y \quad (\text{III, 21})$$

где k_p — коэффициент передачи (пропорциональности) регулятора.

Каждому значению входной величины П-регулятора соответствует определенное значение выходной величины. Сигнал на выходе П-регуляторов меняется только при изменении сигнала на входе.

Параметром настройки П-регулятора является зона регулирования, или предел пропорциональности δ , под которым понимают диапазон изменения входной величины регулятора, выраженный в процентах от максимального интервала, в пределах которого изменение входной величины приводит к изменению выходной величины регулятора от одного крайнего значения до другого. Значение пределов пропорциональности П-регулятора может изменяться и устанавливаться в широких пределах, оно может составлять от двух до нескольких тысяч процентов.

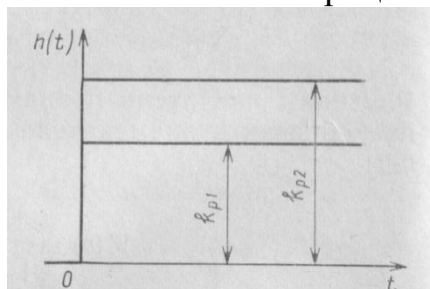


Рис. III-8. Переходные характеристики П-регулятора при разных значениях коэффициента передачи.

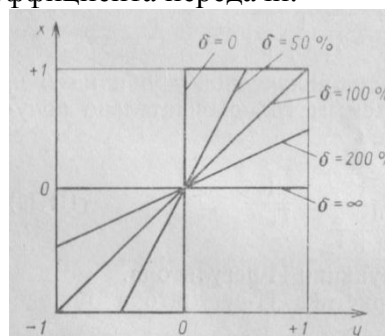


Рис. III-7. Статические характеристики П-регулятора при разных значениях предела пропорциональности.

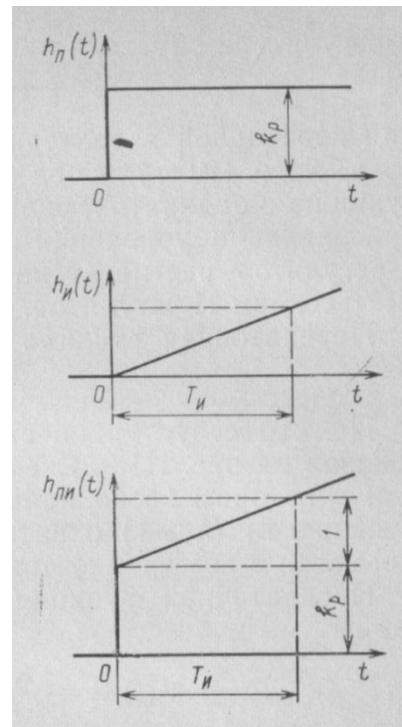
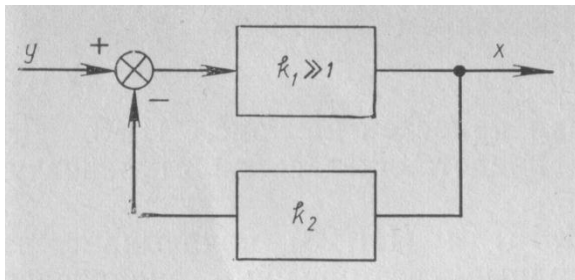


Рис. III-9. Структурная схема П-регулятора.

Рис. III-10. Переходные характеристики пропорциональной $h_p(t)$ и интегральной $h_i(t)$ составляющих и общая переходная характеристика $h_{\pi\pi}(t)$ ПИ-регулятора.

Семейство статических характеристик П-регулятора при различных значениях (6 приведено на рис. III-7. При $\delta=100\%$ изменению входной величины регулятора y на 1% диапазона ее изменения соответствует изменение выходной величины x на 1% диапазона ее изменения.

При крутой статической характеристике ($\delta < 100\%$) пропорциональная зависимость между величинами x и y наблюдается только внутри границ предела пропорциональности. Значениям параметра за границами предела пропорциональности соответствуют либо максимальное, либо минимальное значения x . При $\delta = 0\%$ П-регулятор работает как двухпозиционный.

При пологой статической характеристике ($\delta > 100\%$) полное изменение входного сигнала приводит к частичному изменению величины x . Последняя не достигает ни одного, ни другого крайнего значений. При $\delta = \infty$ (статическая характеристика — горизонтальная прямая) изменение входа y вообще не приводит к изменению выходной величины. Таким образом, степень влияния входной величины П-регулятора на выходную возрастает с уменьшением значения предела пропорциональности.

Предел пропорциональности δ связан с коэффициентом передачи регулятора k_p соотношением

$$\delta = \frac{1}{k_p} \cdot 100\% \quad (\text{III, 22})$$

В динамическом отношении П-регулятор представляет собой усиленное звено (см. табл. I.3).

Переходная характеристика П-регулятора определяется выражением

$$h(t) = k_p \quad (\text{III, 23})$$

Вид переходной характеристики приведен на рис. III-8. Для идеального П-регулятора она представляет собой ступенчатую функцию с ординатой, равной k_p .

Сравнение уравнений (III,15) и (III,23) показывает, что П-регулятор реагирует на входные возмущения значительно быстрее, чем И-регулятор.

Передаточная функция П-регулятора имеет вид

$$W(p) = k_p \quad (\text{III, 24})$$

Пример структурной схемы промышленного П-регулятора показан на рис. III-9. Схема представляет собой замкнутый контур, в котором звено прямой связи с большим коэффициентом усиления k_1 ($k_1 \gg 1$) охватывается звеном отрицательной обратной связи с коэффициентом усиления k_2 .

Передаточная функция системы, приведенной на рис. III-9, равна

$$W(p) = \frac{k_1}{1+k_1k_2} = \frac{1}{\frac{1}{k_1}+k_2} = \frac{1}{k_2} = k_p \quad (\text{III, 25})$$

Таким образом, величина коэффициента усиления П-регулятора k_p определяется коэффициентом усиления звена обратной связи k_2 .

Амплитудно-фазовая характеристика П-регулятора выражается следующим образом

$$W(i\omega) = k_p e^{i0} \quad (\text{III, 26})$$

При гармоническом изменении входной величины выходная величина П-регулятора изменяется по гармоническому закону без запаздывания; при этом амплитуда выходных колебаний в k_p раз больше (или меньше) амплитуды входных колебаний. На произвольное изменение входной величины П-регулятор реагирует таким же по форме изменением выходной величины.

Пропорционально-интегральные регуляторы (ПИ-регуляторы). Их выходная величина изменяется под действием пропорциональной и интегральной составляющих. Уравнение динамики ПИ-регулятора имеет вид

$$x = k_p y + \frac{1}{T_i} \int_0^t y dt \quad (\text{III, 27})$$

где k_p — коэффициент передачи регулятора; T_i — время интегрирования.

ПИ-регулятор имеет два параметра настройки. Пропорциональная составляющая настраивается с помощью предела пропорциональности δ , интегральная составляющая регулятора —

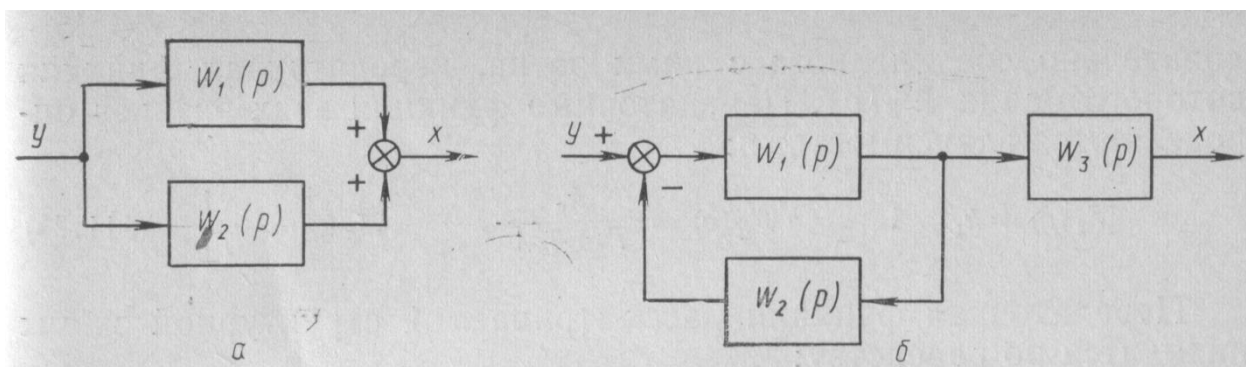


Рис. III-11. Структурные схемы ПИ-регулятора.

посредством изменения времени интегрирования $T_{\text{и}}$. Воздействие входной величины ПИ-регулятора на выходную повышается с уменьшением предела пропорциональности δ и уменьшением времени интегрирования $T_{\text{и}}$.

Переходная характеристика ПИ-регулятора описывается зависимостью

$$h(t) = k_p + \frac{1}{T_{\text{и}}} t \quad (\text{III, 28})$$

На рис. III-10 приведены переходные характеристики пропорциональной составляющей $h_{\text{п}}(t)$, интегральной составляющей $h_{\text{и}}(t)$ и переходная характеристика ПИ-регулятора $h_{\text{пи}}(t)$. Из рисунка видно, что пропорциональная составляющая действует одновременно с изменением входной величины регулятора, а интегральная составляющая — и после изменения входной величины.

Для нахождения передаточной функции ПИ-регулятора приведем уравнение динамики (III,27) к операторной форме

$$x(p) = k_p y(p) + \frac{1}{T_{\text{и}} p} y(p)$$

откуда получим

$$W(p) = k_p + \frac{1}{T_{\text{и}} p} \quad (\text{III, 29})$$

Промышленные ПИ-регуляторы обычно состоят в соответствии со структурными схемами, приведенными на рис. III-11. Структурная схема, приведенная на рис. III-11,а, содержит два параллельно соединенных звена: усилительное (передаточная функция $W_1(p)=k_p$) и интегрирующее [передаточная функция $W_2(p) = 1/(T_{\text{и}} p)$]. Передаточная функция такой системы $W(p)$ находится из равенства:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) = k_p + \frac{1}{T_{\text{и}} p}$$

которое совпадает с выражением (III,29).

Структурная схема, показанная на рис. III-11,б состоит из звена (передаточная функция $W_1(p)$), охваченного отрицательной обратной связью (передаточная функция $W_2(p)$)

и последовательно соединенного с ними звена, передаточная функция которого равна $W_3(p)$. Передаточные функции этих звеньев определяются зависимостями:

$$W_1(p) = k_1 \gg 1 \quad W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1} \quad W_3(p) = \frac{1}{T_1 p} \quad (\text{III, 30})$$

Передаточная функция рассматриваемой структурной схемы находится по равенству:

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)} W_3(p)$$

После подстановки в него зависимостей (III,30) получим

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{k_1}{1 + k_1 \frac{k_2}{T_2 p + 1}} \cdot \frac{1}{T_1 p} = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{k_2}{T_2 p + 1}} \cdot \frac{1}{T_1 p} = \frac{T_2 p + 1}{k_2} \cdot \frac{1}{T_1 p} \\ &= \frac{T_2}{k_2 T_1} + \frac{1}{k_2 T_1 p} \end{aligned}$$

Обозначая $T_2/(k_2 T_1)$ через k_p , а $1/(k_2 T_1)$ через $1/T_{\text{и}}$, окончательно получим

$$W(p) = k_p + \frac{1}{T_{\text{и}} p}$$

Это выражение совпадает с зависимостью (III,29).

Для нахождения амплитудно-фазовой характеристики ПИ-регулятора в уравнении (III,29) комплексную величину p заменим на мнимую $i\omega$ и, освобождаясь от мнимости в знаменателе, получим

$$W(i\omega) = k_p + \frac{1}{T_{\text{и}} i\omega} = k_p - i \frac{1}{T_{\text{и}} \omega}$$

или в показательной форме

$$W(i\omega) = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)} = \frac{\sqrt{k_p^2 T_{\text{и}}^2 \omega^2 + 1}}{T_{\text{и}} \omega} e^{-i \arctg \frac{1}{k_p T_{\text{и}} \omega}} \quad (\text{III, 31})$$

График АФХ ПИ-регулятора см. ниже в табл. III.9.

При гармоническом изменении входной величины выходная величина ПИ-регулятора также испытывает гармонические колебания, амплитуда и фазовый сдвиг которых зависят от частоты колебаний ω и величины настроечных параметров регулятора k_p и $T_{\text{и}}$. С возрастанием ω от 0 до $+\infty$ АЧХ регулятора монотонно уменьшается от ∞ до значения k_p , а запаздывание выходных колебаний по фазе относительно входных постепенно уменьшается от величины $-\pi/2$ до 0 (см. ниже в табл. III.9).

Реакция ПИ-регулятора $x_{\text{пи}}$ и отдельных его составляющих $x_{\text{п}}$ и $x_{\text{и}}$ на гармоническое изменение входной величины показана на рис. III-12. Значение выходной величины $x_{\text{пи}}$ получено алгебраическим сложением величин $x_{\text{п}}$ и $x_{\text{и}}$. Сравнение этих, зависимостей

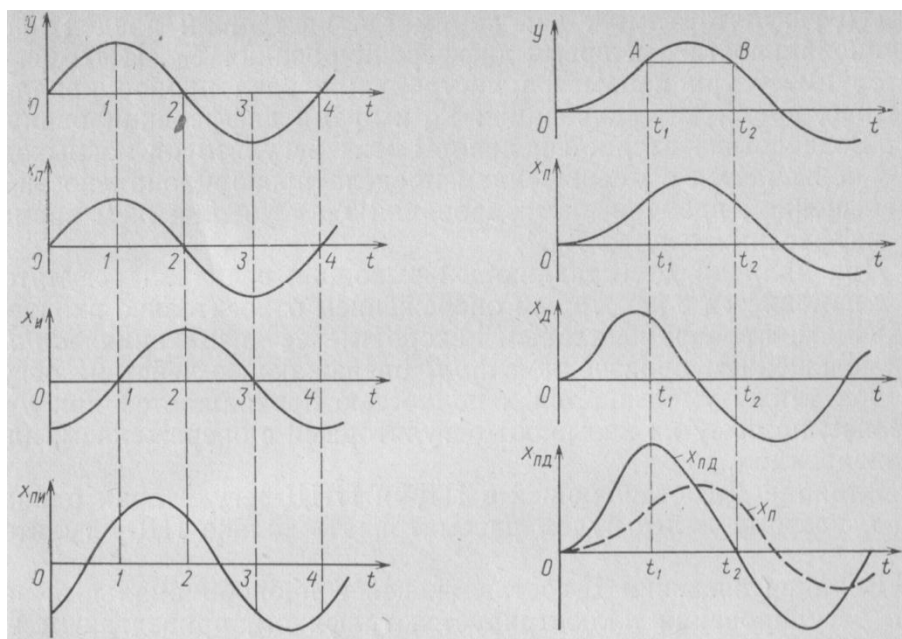


Рис. III-12. График изменения составляющих x_p , x_i и общей выходной величины $x_{\pi i}$ ПИ-регулятора при гармоническом изменении входной величины y .

показывает, что величина $x_{\pi i}$ всегда реагирует медленнее, чем x_p , но быстрее, чем x_i , и, следовательно, на одинаковое изменение входной величины ПИ-регулятор будет реагировать с некоторым отставанием по сравнению с П-регулятором, но всегда будет опережать действие И-регулятора.

Пропорционально-дифференциальные и пропорционально интегрально дифференциальные регуляторы (ПД- и ПИД - регуляторы). В ряде случаев качество регулирования можно повысить введением в закон регулирования составляющей, пропорциональной первой производной или скорости изменения входной величины регулятора. Эта дифференцирующая составляющая (Д-составляющая) формируется при помощи дополнительного устройства.

Уравнения динамики ПД- и ПИД - регуляторов имеют вид

$$x = k_p y + T_d \frac{dy}{dt} \quad (\text{III, 32})$$

$$x = k_p y + \frac{1}{T_i} \int_0^t y dt + T_d \frac{dy}{dt} \quad (\text{III, 33})$$

где k_p — коэффициент передачи регулятора; T_i — время интегрирования; T_d — время дифференцирования.

ПД - регулятор имеет два параметра настройки: предел пропорциональности δ и время дифференцирования T_d . ПИД - регулятор имеет три параметра настройки: предел пропорциональности δ , время интегрирования T_i и время дифференцирования T_d . Воздействие входной величины этих регуляторов на выходную повышается с уменьшением предела пропорциональности уменьшением времени интегрирования T_i и увеличением времени дифференцирования T_d .

При наличии Д-составляющей выходная величина регулятора x изменяется с некоторым опережением относительно входной величины, пропорциональным скорости ее изменения dy/dt . С уменьшением производной dy/dt опережающее действие регулятора также уменьшается и полностью прекращается при $y = \text{const}$; поэтому их называют регуляторами с опережением, или предварением.

Влияние Д-составляющей в ПД- и ПИД - регуляторах одинаково, поэтому далее будем рассматривать только ПД - регуляторы.

Влияние введения Д-составляющей в пропорциональный закон регулирования иллюстрируется графиком, приведенным на рис. III-13, где показаны изменение пропорциональной $x_{\text{П}}$ и дифференциальной $x_{\text{Д}}$ составляющих, а также пропорционально-дифференциальной $x_{\text{ПД}}$ составляющей, т. е. ПД - закона регулирования при непрерывном изменении входной величины y .

В случае применения П - регулятора при одинаковом отклонении регулируемой величины от заданного значения (точки A и B) величина воздействия на объект будет одинакова независимо от того, удаляется ее значение от заданного или приближается к нему. Для повышения же качества регулирования воздействие регулятора должно было бы быть большим в случае удаления регулируемой величины от заданного значения, чем при противоположном изменении. Это требование выполняется при введении в закон регулирования Д-составляющей; при нахождении регулируемой величины в точке A выходная величина ПД - регулятора больше (воздействия П- и Д-составляющих регулятора складываются), чем в точке B (воздействия П- и Д-составляющих регулятора вычитаются).

При наличии в законе регулирования Д-составляющей регулятор реагирует и на изменения скорости входной величины, т.е. на интенсивность ее изменения; такой регулятор вступает в работу быстрее, чем П - регулятор. Введение в закон регулирования воздействия по производной приводит к усилению влияния регулятора на переходный процесс, при этом сокращается время переходного процесса и уменьшаются колебания регулируемой величины.

Переходная характеристика ПД - регулятора $h(t)$ приведена на рис. III-14. Она отличается от переходной характеристики П - регулятора большим изменением выходной величины сразу же после изменения величины y . С течением времени отклонение x уменьшается, и величина x становится постоянной и равной $x_{\text{Д}}$ в соответствии со значением предела пропорциональности П-составляющей регулятора. Физически действие предварения можно представить как временное уменьшение действия обратной связи регулятора.

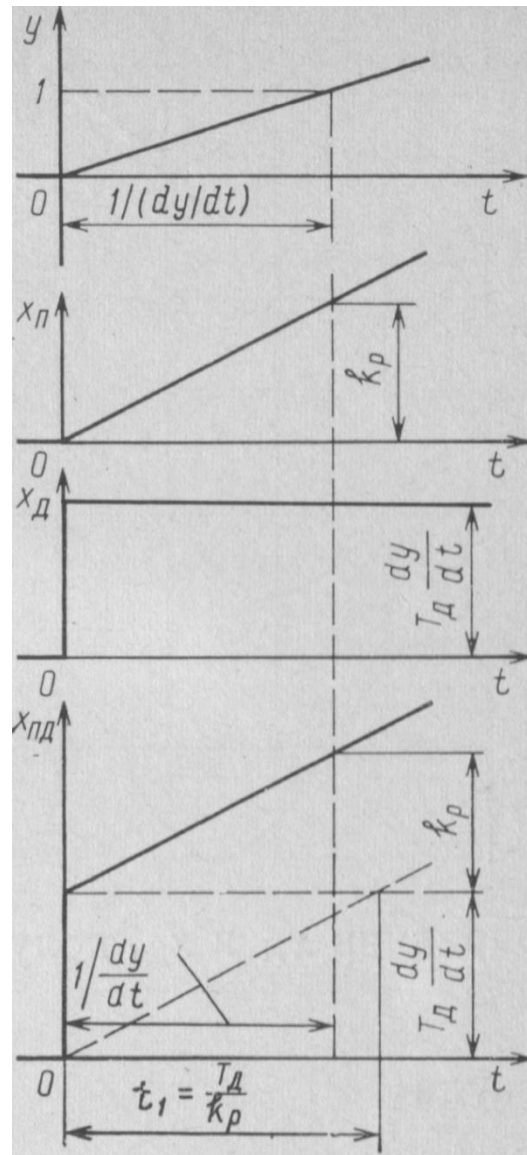
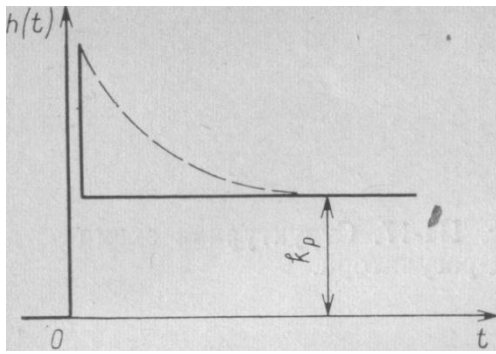


Рис. III-14. Переходная характеристика ПД-регулятора.

Рис. III-15. График изменения составляющих x_{Π} , x_D и общей выходной величины $x_{\Pi D}$ ПД-регулятора при изменении входной величины y с постоянной скоростью.

Динамическая характеристика ПД - регулятора для случая, когда входная величина изменяется с постоянной скоростью, приведена на рис. III-15. Для сравнения там же приведена аналогичная характеристика для П - регулятора. Выходные величины П- и ПД - регуляторов изменяются с одинаковой скоростью, равной $k_p \cdot dy/dt$, но при ПД - регуляторе выходная величина всегда на $T_d \cdot dy/dt$ больше, чем при П - регуляторе. По сравнению с x_{Π} выходная величина x_{GL} достигает тех же значений с опережением, равным T_d/k_p . По графикам (см. рис. III-15) можно найти время дифференцирования T_d . Обозначим через t_1 время, в течение которого величина x_{Π} достигает ступенчатого изменения величины x_D , равного

$$x_D = T_d \frac{dy}{dt} \quad (\text{III, 34})$$

Изменение x_{Π} за время t_1 равно

$$x_{\Pi} = k_p \frac{dy}{dt} t_1 \quad (\text{III, 35})$$

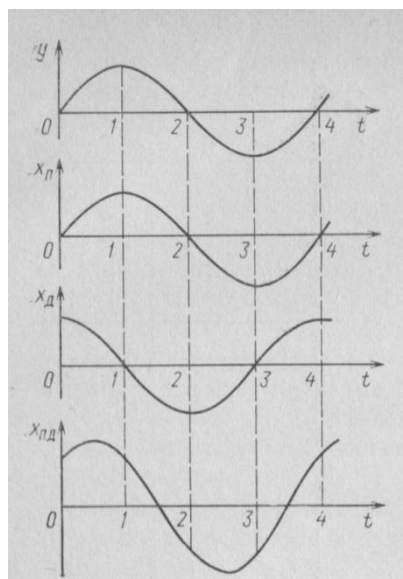


Рис. III-16. График изменения составляющих x_p , x_d и общей выходной величины $x_{пд}$ ПД-регулятора при гармоническом изменении входной величины y .

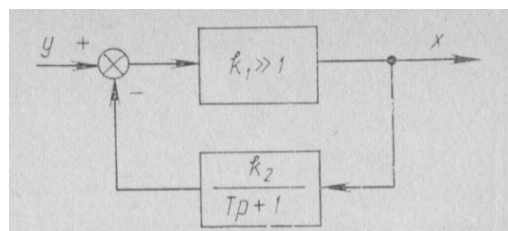


Рис. III-17. Структурная схема ПД-регулятора.

Приравняв x_p и x_d , получим

$$T_d = k_p t_1 \quad (\text{III, 36})$$

Откуда

$$t_1 = T_d / k_p \quad (\text{III, 37})$$

Таким образом, время дифференцирования T_d —это отрезок времени, на который выходная величина ПД - регулятора $x_{пд}$ опережает его пропорциональную составляющую x_p при изменении входной величины с постоянной скоростью и при условии, что коэффициент передачи регулятора k_p равен единице.

Графики, приведенные на рис. III-16, позволяют сравнить работу ПД- и П - регуляторов при колебательном изменении входной величины y . На рисунке показано изменение выходной величины регулятора во времени под действием только Проставляющей (выходная величина П - регулятора) x_p и только Д-составляющей x_d . Отметим, что максимальное отклонение величины x_d наблюдается при максимальной скорости изменения параметра y . Зависимость $x_{пд}$ (выходная величина ПД - регулятора) получена путем алгебраического сложения ординат кривых x_p и x_d . Из рисунка видно, что изменение величины $x_{пд}$ опережает изменение величины x_p , а следовательно, и изменение параметра y . Это еще раз подтверждает, что в замкнутом контуре регулирования при отклонении регулируемой величины от заданного значения ПД - регулятор вступает в работу раньше, чем П - регулятор.

Структурная схема ПД - регулятора приведена на рис. III-17, Она состоит из усилительного звена с очень большим коэффициентом передачи ($k \gg 1$) и апериодического звена 1-го порядка, установленного в цепи отрицательной обратной связи.

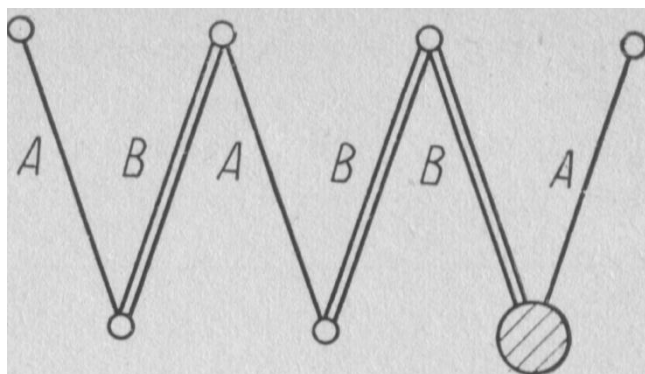


Рис. III-18. Термоэлектрический термометр с Д-составляющей.

Передаточная функция $W(p)$ такой системы, в соответствии с равенством (I,49) она равна

$$W(p) = \frac{k_1}{1 + k_1 \frac{k_2}{Tp + 1}}$$

Разделив числитель и знаменатель полученного выражения на k_1 и пренебрегая в знаменателе слагаемым $1/k_1$ получим

$$W(p) = \frac{1}{\frac{k_2}{Tp + 1}} = \frac{1}{k_2} + \frac{T}{k_2} p$$

Вводя новые обозначения $k_p = 1/k_2$ и $T_d = T/k_2$, окончательно находим

$$W(p) = k_p + T_d p \quad (\text{III, 38})$$

Дифференциальная составляющая может быть введена в закон регулирования и с помощью других элементов системы, например, термоэлектрического термометра с Д-составляющей (рис. III-18), состоящего из трех термопар, две из которых включены последовательно, а третья — встречно. Масса рабочего спая третьей термопары значительно больше, чем у первых двух. При тепловом равновесии все три спая имеют одинаковые температуры и термопары развивают одинаковые ТЭДС; при этой суммарная ТЭДС такой цепи равна ТЭДС одной термопары. При изменении температуры две первые термопары практически сразу начнут менять свою ТЭДС, а изменение ТЭДС третьей термопары будет отставать от них тем больше, чем больше различие масс рабочих спаев термопар и скорость изменения температуры. В частности, при возрастании температуры с постоянной скоростью ТЭДС цепи термопар будет больше, чем ТЭДС одной термопары.

Уравнения динамики, переходные характеристики и их графики, передаточные функции и простейшие структурные схемы изложенных выше линейных законов регулирования приведены в табл. III.8, а их частотные характеристики — в табл. III.9.

3. Исполнительные устройства

Устройство автоматической системы управления или регулирования, воздействующее на процесс в соответствии с получаемой командной информацией, называется исполнительным

Таблица III.8. Уравнения динамики и характеристики линейных законов регулирования

Закон регулирования	Уравнение динамики	Переходная характеристика
П	$x = k_p y$	$h(t) = k_p$
И	$x = \frac{1}{T_{\text{И}}} \int_0^t y dt$	$h(t) = \frac{1}{T_{\text{И}}} t$
ПИ	$x = k_p y + \frac{1}{T_{\text{И}}} \int_0^t y dt$	$h(t) = k_p + \frac{1}{T_{\text{И}}} t$
ПД	$x = k_p y + T_{\text{Д}} \frac{dy}{dt}$	$h(t) = k_p + T_{\text{Д}} \delta(t)$
ПИД	$x = k_p y + \frac{1}{T_{\text{И}}} \int_0^t y dt + T_{\text{Д}} \frac{dy}{dt}$	$h(t) = k_p + \frac{1}{T_{\text{И}}} t + T_{\text{Д}} \delta(t)$

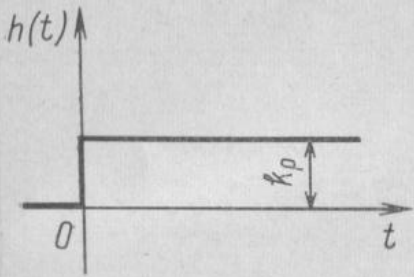
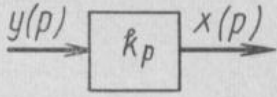
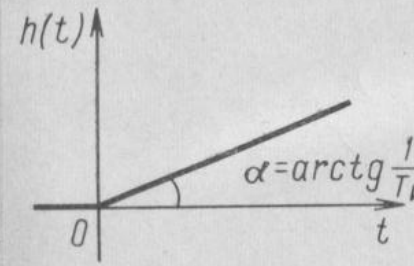
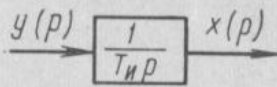
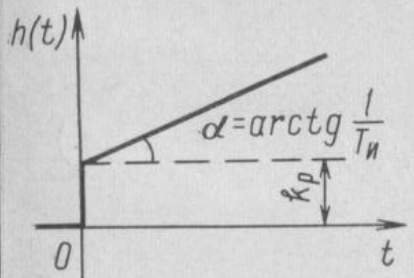
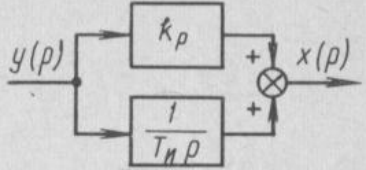
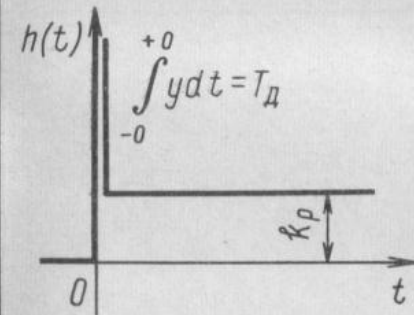
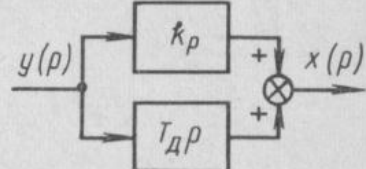
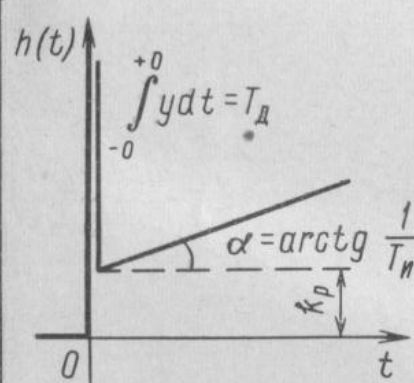
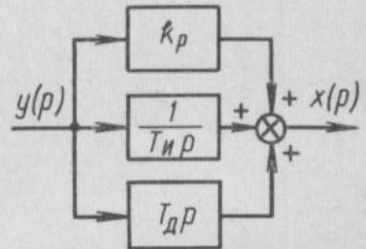
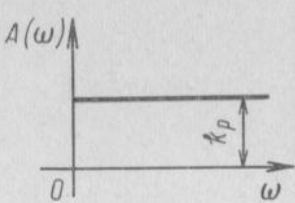
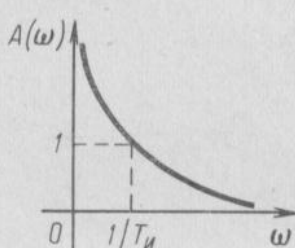
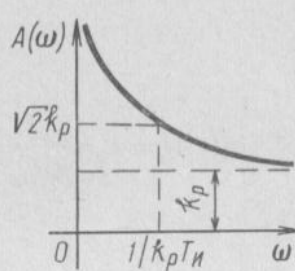
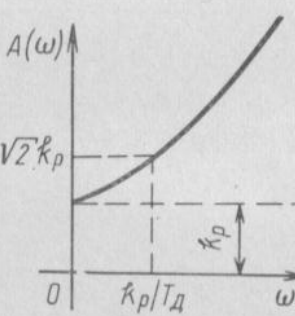
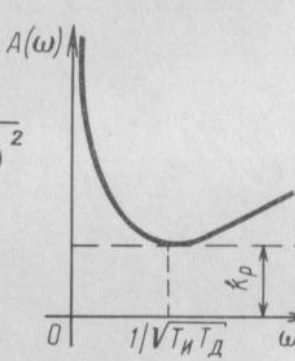
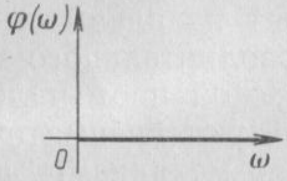
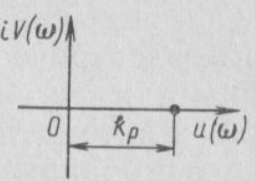
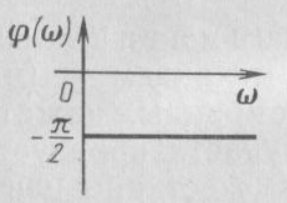
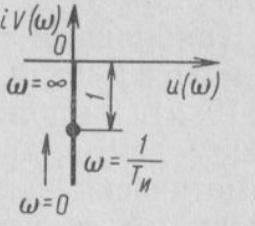
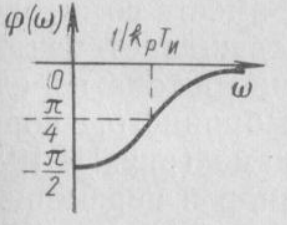
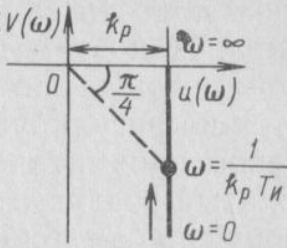
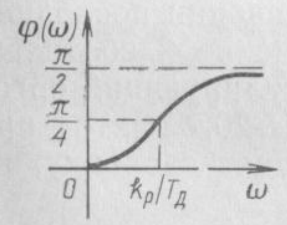
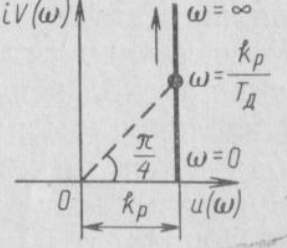
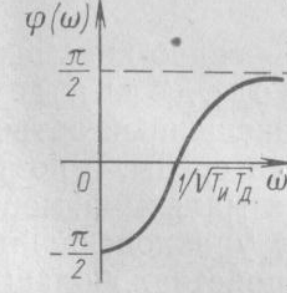
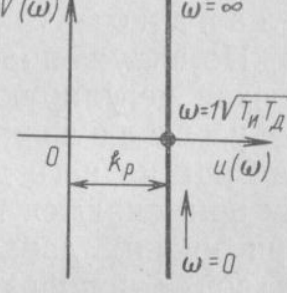
График переходной характеристики	Передаточная функция	Простейшая структурная схема
	$W(p) = k_p$	
	$W(p) = \frac{1}{T_n p}$	
	$W(p) = k_p + \frac{1}{T_n p}$	
	$W(p) = k_p + T_d p$	
	$W(p) = k_p + \frac{1}{T_n p} + T_d p$	

Таблица III.9 Частотные характеристики линейных законов регулирования

Закон регулирования	Амплитудно-частотная характеристика		Фазо-частотная
	уравнение	график	уравнение
П	$A(\omega) = k_p$		$\varphi(\omega) = 0$
И	$A(\omega) = \frac{1}{T_n \omega}$		$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$
ПИ	$A(\omega) = \sqrt{k_p^2 + \frac{1}{T_n^2 \omega^2}}$		$\varphi(\omega) = \arctg \left(-\frac{1}{k_p T_n \omega} \right)$
ПД	$A(\omega) = \sqrt{k_p^2 + T_d^2 \omega^2}$		$\varphi(\omega) = \arctg \frac{T_d \omega}{k_p}$
ПИД	$A(\omega) = \sqrt{k_p^2 + \left(T_d \omega - \frac{1}{T_n \omega} \right)^2}$		$\varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{T_d \omega}{k_p} - \frac{1}{k_p T_n \omega} \right)$

характеристика	Амплитудно-фазовая характеристика	
график	уравнение	график
	$W(i\omega) = k_p$	
	$W(i\omega) = -i \frac{1}{T_n \omega}$	
	$W(i\omega) = k_p - i \frac{1}{T_n \omega}$	
	$W(i\omega) = k_p + i T_d \omega$	
	$W(i\omega) = k_p - i \frac{1}{T_n \omega} + i T_d \omega$	

устройством. Оно предназначено для изменения притока или расхода вещества либо энергии и приближения регулируемой величины к заданному значению. Исполнительные устройства устанавливаются на технологических трубопроводах. От свойств исполнительного устройства, как и любого другого элемента автоматической системы, зависит качество регулирования.

Обычно исполнительные устройства состоят из пневматического, электрического или гидравлического исполнительного механизма и регулирующего органа. В химической промышленности в автоматических системах часто используют пневматические мембранный и поршневой исполнительные механизмы, а в качестве регулирующих органов — регулирующий клапан и заслонку.

Наибольшее распространение получил пневматический мембранный исполнительный механизм (рис. III-19, а), выполненный из прорезиненной мембраны, зажатой между двумя крышками так, что в верхней части образуется герметически закрытая полость. Снизу через жесткий центр, связанный со штоком, мембрана опирается на пружину. Сжатый воздух от автоматического регулятора направляется в верхнюю полость над мембраной и перемещает ее вместе со штоком вниз. При этом пружина сжимается и уравнивает усилие, действующее на мембрану сверху. Перемещение штока передается на регулирующий орган. В отличие от мембранного, в поршневом пневматическом исполнительном механизме (рис. III.19,б) сжатый воздух от регулятора подается в цилиндр и перемещает поршень со штоком и регулирующий орган.

Схемы регулирующих органов показаны на рис. III-20. В регулирующем клапане шток исполнительного механизма жестко связан с затвором (рис. III-20,а). При перемещении последнего относительно седла изменяется проходное сечение и соответственно расход вещества, проходящего через регулирующий орган. В заслоночном регулирующем органе (рис. III -20, б) шток привода через рычаг, соединенный с осью, вращает заслонку, которая изменяет расход вещества.

Исполнительное устройство, состоящее из пневматического мембранного исполнительного механизма и регулирующего органа, называют пневматическим регулирующим клапаном (рис. III-21).

По виду запорного устройства пары затвор—седло пневматические регулирующие клапаны делят на односедельные и двухседельные. Первые имеют неуравновешенный затвор, так как на него действует выталкивающая сила среды, и поэтому применяются в исполнительных устройствах малых размеров при низких давлениях среды. Вторые имеют уравновешенный затвор и используются в исполнительных устройствах больших размеров и при высоких давлениях среды.

Пневматические регулирующие клапаны могут быть «нормально открытыми» и «нормально закрытыми». У нормально

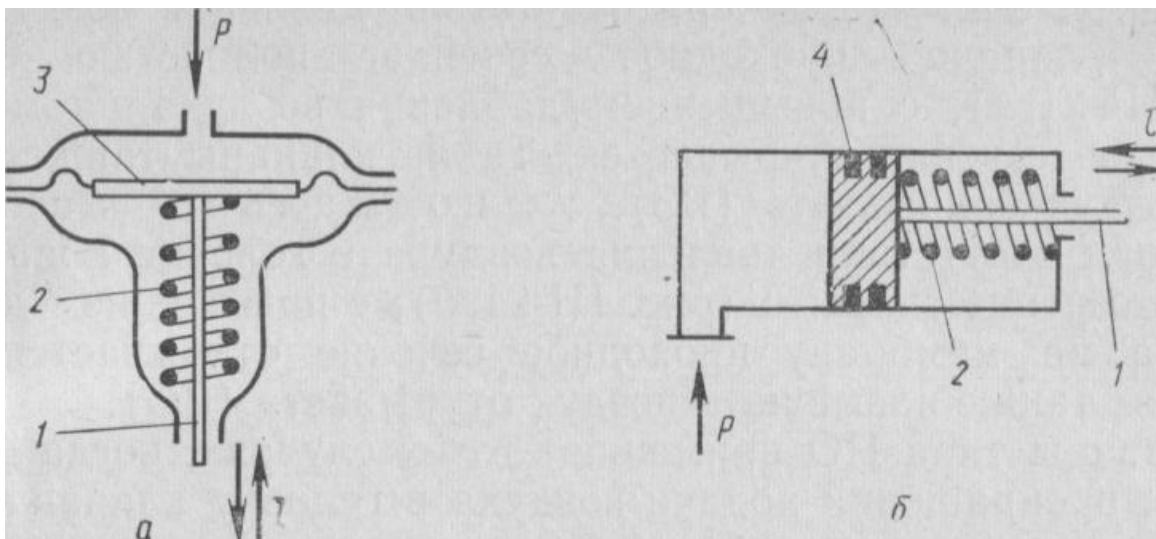


Рис. III.19. Схемы мембранного (а) и поршневого (б) исполнительных механизмов:

1 — шток; 2 — пружина; 3 — мембрана; 4 — поршень.

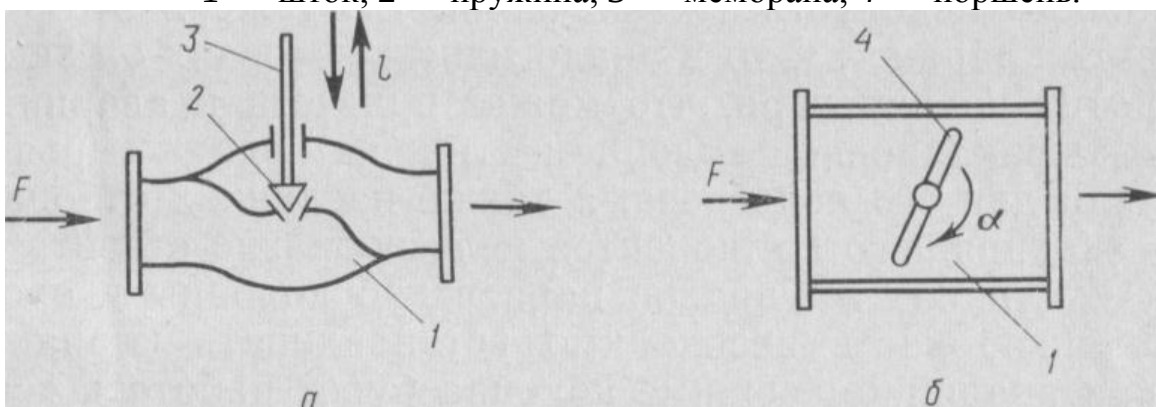


Рис. III-20. Схемы регулирующих органов:

а - односедельного; б — заслоночного; 1 — корпус; 2 - затвор; 3 - шток; 4 - заслонка.

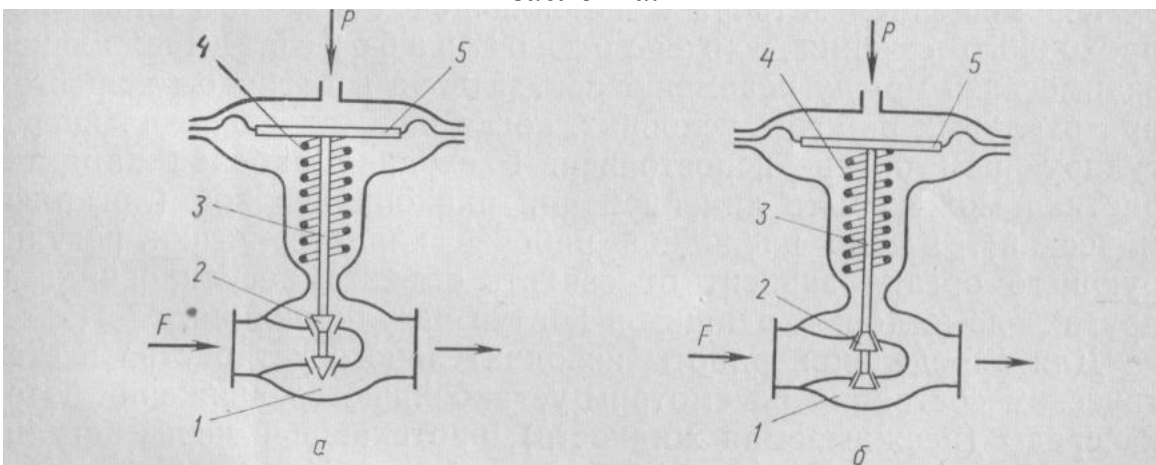


Рис. III-21. Схемы пневматических регулирующих клапанов:

а – нормально открытого (НО), б – нормально закрытого (НЗ);
1 – корпус, 2 – затвор, 3 – шток, 4 – пружина, 5 мембрана.

открытых (НО) при отсутствии давления воздуха в головке клапана проходное сечение полностью открыто (рис. III-21,а); с повышением давления воздуха на мембрану проходное сечение закрывается. Такие клапаны также называют «воздух закрывает» (ВЗ). У нормально закрытых (НЗ) при отсутствии давления воздуха в головке клапана проходное сечение закрыто (рис. III-21,б); с повышением давления воздуха на мембрану проходное сечение открывается. Такие клапаны также называют «воздух открывает» (ВО).

Клапаны типа НО применяют в тех случаях, когда при аварийном прекращении подачи воздуха в головку клапана по технологическим условиям более безопасно иметь открытую линию. В противном случае ставят клапан НЗ. Например, при регулировании с помощью подачи пара температуры реактора, в котором возможно затвердевание вещества, следует использовать клапан НО. При выходе из строя системы подачи воздуха такой клапан полностью откроется и температура в реакторе не понизится до недопустимых значений. Если же в этом случае установить клапан НЗ, то в аналогичных условиях он закроется и прекратит подачу пара, что может привести к аварии.

В ректификационной колонне на линиях подачи сырья и теплоносителя для его подогрева, а также на линиях отбора высоко- и низкокипящего компонентов целесообразно ставить клапаны НЗ; на линиях же подачи пара в куб колонны и орошения в ее верхнюю часть необходимо устанавливать клапаны НО. Тогда при аварийном режиме колонна будет работать «сама на себя». После ликвидации неисправности такая колонна может быстрее быть выведена на заданный режим, чем в случае ее полного останова.

Работа регулирующих органов определяется их характеристиками: конструктивной, выражающей взаимосвязь между перемещением затвора и изменяющейся при этом площадью проходного сечения и расходной рабочей, выражающей взаимосвязь между перемещением затвора и расходом вещества при реальных рабочих условиях, когда перепад давления на регулирующем органе непостоянен. Расходная рабочая характеристика может быть линейной или равнопроцентной (логарифмической). Выбор расходной рабочей характеристики регулирующего органа зависит от свойств объекта регулирования и других элементов, входящих в контур регулирования.

Для определения работы исполнительного устройства в статическом состоянии рассмотрим установившееся движение потока среды (несжимаемая жидкость), протекающей через регулирующий орган исполнительного устройства. Используя уравнение Бернулли для горизонтального потока и свойство неразрывности среды при равных входном и выходном сечениях регулирующего органа, можно записать

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \xi \frac{W^2}{2} \quad (\text{III, 39})$$

где P_1 и P_2 — статические давления среды соответственно во входном и выходном сечениях регулирующего органа, Па; ρ — плотность жидкости, кг/м³; W — скорость жидкости в регулирующем органе, м/с; ξ — коэффициент гидравлического сопротивления. Подставляя в уравнение (III,39) значение $W = F/A$ (F — расход среды, м³/с; A — площадь проходного сечения регулирующего органа, м²) и проводя необходимые преобразования, получим

$$F = B \frac{A}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (\text{III, 40})$$

где B — числовой коэффициент; $\Delta P = P_1 - P_2$ — перепад давления на регулирующем органе, Па.

Член $BA/\sqrt{\xi}$ называют коэффициентом пропускной способности регулирующего органа и обозначают K_v . Коэффициент K_v отражает влияние гидравлического сопротивления и площади проходного сечения регулирующего органа, измеряется в м².

Для жидкости коэффициент K_v рассчитывают по уравнению

$$K_v = 36 \cdot 10^3 F \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}} \quad (\text{III, 41})$$

где F — расход жидкости, проходящей через регулирующий орган, м³/с; ΔP — перепад давления на регулирующем органе, Па, ρ — плотность жидкости, кг/м³.

Для сжимаемых сред (газ или пар) в уравнение (III,41) вводят соответствующие поправочные коэффициенты.

Обычно при расчете регулирующих органов определяют максимальную пропускную способность $K_{v \max}$, которая соответствует $\Delta P_{\min}$.

В промышленности пользуются понятием условной пропускной способности регулирующего органа K_{vy} , которую определяют экспериментально как расход жидкости в м³/ч, имеющей плотность $\rho = 1$ г/см³ и пропускаемой регулирующим органом при перепаде давления на нем в 1 кгс/см². Величина коэффициента условной пропускной способности K_{vy} характерна для каждого регулирующего органа. Поэтому ее используют с целью сравнения различных регулирующих органов по их производительности в статическом режиме.

При расчете АСР пневматический регулирующий клапан представляют аperiodическим звеном 1-го порядка.

ГЛАВА IV

ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

1. Одноконтурные автоматические системы регулирования

Рассмотрим АСР, предназначенные для регулирования (поддержания на постоянном заданном значении) одной технологической величины, реагирующие на ее отклонение от заданного значения и имеющие один замкнутый контур. Это наиболее распространенные одномерные одноконтурные замкнутые АСР.

Блок-схема АСР приведена на рис. IV-1. АСР представляет собой замкнутую цепь, состоящую из объекта регулирования ОР, измерительного преобразователя ИП, автоматического регулятора АР и исполнительного устройства ИУ. Возмущающее воздействие z приводит к отклонению регулируемой технологической величины объекта y от заданного значения u . Информация об изменении регулируемой величины воспринимается измерительным преобразователем системы ИП и передается на автоматический регулятор АР. Последний сравнивает текущее значение регулируемой величины y с заданным u и в зависимости от знака и величины рассогласования по заранее заложенному в регулятор закону (алгоритму) вырабатывает регулирующее воздействие x , которое через исполнительное устройство ИУ направляется на объект регулирования ОР и приводит к ликвидации или уменьшению этого рассогласования. Таким образом, причина, вызвавшая срабатывание регулятора, в свою очередь, находится под его обратным воздействием.

Примером АСР может служить система регулирования температуры продукта укрепляющей части ректификационной колонны (рис. IV-2). Измерительный преобразователь системы ИП (термоэлектрический термометр в комплекте со вторичным прибором) измеряет температуру продукта, покидающего укрепляющую часть колонны, и передает сигнал на автоматический регулятор АР. При появлении возмущения z АР реагирует на отклонение текущего значения температуры y от заданного u .

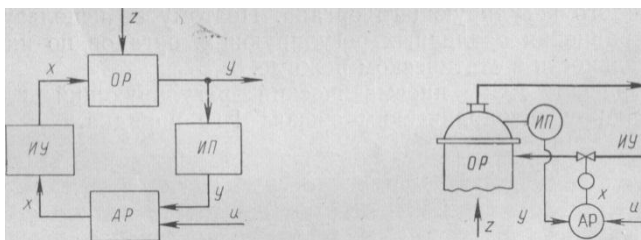


Рис. IV-1. Блок-схема одноконтурной АСР.

Рис. IV-2. Функциональная схема АСР температуры укрепляющей части ректификационной колонны.

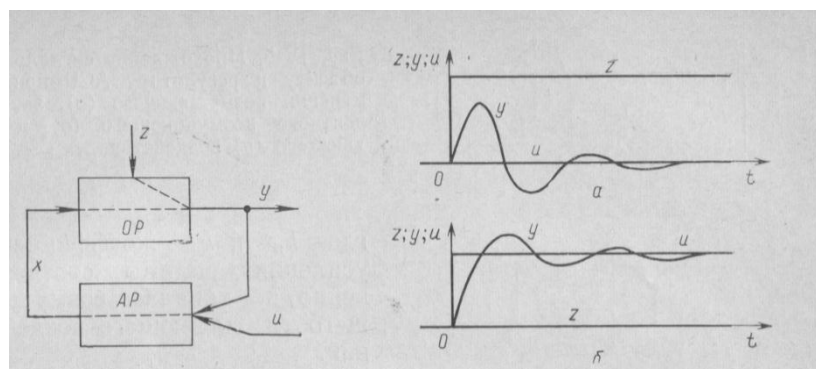


Рис. IV-3. Простейшая структурная схема одноконтурной АСР.

Рис IV-4. Переходные процессы при изменении возмущающего (а) и задающего (б) воздействий.

и вырабатывает регулирующее воздействие x на исполнительное устройство ИУ, которое изменяет в нужном направлении подачу флегмы в колонну, вследствие чего температура продукта в ректификационной колонне возвращается к заданному значению. При увеличении температуры продукта на выходе из верхней части ректификационной колонны автоматический регулятор увеличивает подачу флегмы в колонну, и наоборот.

При исследовании одномерных одноконтурных замкнутых АСР их структурную схему приводят к простейшему виду: объект ОР и регулятор АР (рис. IV-3). При этом все звенья, определяющие динамические свойства чувствительных элементов, измерительных устройств, исполнительных устройств и линии связи, относят обычно к объекту. Такие системы имеют как минимум две входные величины (возмущающее z и задающее u воздействия), действие которых приводит к изменению одной выходной величины — текущего значения регулируемой величины y . Переходные процессы, возникающие при изменении возмущающего z и задающего u воздействий, приведены на рис. IV-4. После нанесения возмущения (рис. IV-4, а) выходная величина y изменяется и возвращается к первоначальному значению (рис. IV-4, а); при изменении задания (рис. IV-4, б) после окончания переходного процесса выходная величина y устанавливается на значении, соответствующем новому заданию. Сигналы в этих системах могут проходить по двум каналам $z \rightarrow y$ и $u \rightarrow y$, которые имеют свои статические и динамические свойства.

Уравнения системы. Уравнения статики системы представляют собой зависимости

$$y = f_1(z) \quad \text{и} \quad y = f_2(u) \quad (\text{IV}, 1)$$

Если эти уравнения линейны или линеаризованы, то они имеют вид

$$y = k_B z \quad \text{и} \quad y = k_3 u \quad (\text{IV}, 2)$$

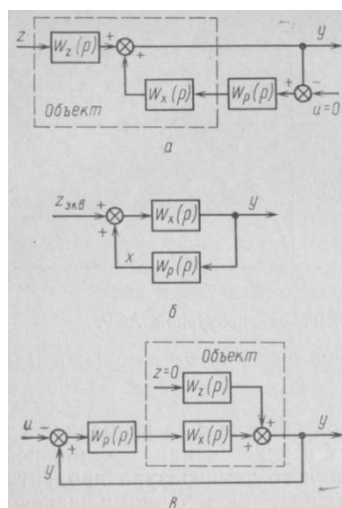


Рис. IV-5. Прохождение сигналов по объекту и регулятору АСР при изменении возмущающего (а), эквивалентного возмущающего (б) и задающего (в) воздействия.

где k_B и k_3 — коэффициенты усиления системы соответственно по каналам возмущающего и задающего воздействий.

При исследовании работы системы в равновесных состояниях коэффициенты k_B и k_3 находят из равенств (IV,2).

Уравнение динамики системы в общем виде

$$F(y, z, u, t) = 0 \quad (\text{IV, 3})$$

При исследовании линейных систем это уравнение может быть записано в упрощенном виде:

$$D(p)y = K_B(p)z + K_3(p)u \quad (\text{IV, 4})$$

Решения этого уравнения, т.е. временные характеристики при изменении возмущения или задания, находят из уравнений

$$D(p)y = K_B(p)z \quad \text{и} \quad D(p)y = K_3(p)u \quad (\text{IV, 5})$$

с учетом начальных условий.

Передаточные функции системы можно найти через передаточные функции объекта и регулятора. В объекте возмущение z проходит по каналу $z \rightarrow y$ (передаточная функция $W_z(p)$), а регулирующее воздействие x по каналу $x \rightarrow y$ (передаточная функция $W_x(p)$). Передаточную функцию автоматического регулятора, которая одинакова, для каналов $y \rightarrow x$ и $u \rightarrow x$, обозначим через $W_p(p)$.

Передаточную функцию системы по каналу возмущающего воздействия $W_{yz}(p)$ можно выразить через передаточные функции объекта и регулятора (рис. IV-5,а):

$$W_{yz}(p) = \frac{y(p)}{z(p)} = \frac{W_z(p)}{1 - W_x(p)W_p(p)} \quad (\text{IV, 6})$$

Передаточная функция $W_{yz}(p)$ определяет зависимость изменения выходной величины y системы, от возмущающего воздействия z , т.е. динамические свойства системы по каналу $z \rightarrow y$. Задающее воздействие u при этом отсутствует ($u = 0$).

Для расчета системы возмущение z целесообразно заменить эквивалентным по влиянию на переходный процесс воздействием, приложенным к той же точке объекта, что и регулирую

щее воздействие. Эквивалентное возмущение $z_{\text{экв}}(p)$ определим по выражению

$$z_{\text{экв}}(p) = z(p)(W_z(p)/W_x(p))$$

Учитывая эту зависимость, передаточную функцию системы по каналу эквивалентного возмущающего воздействия $W_{yz \text{ экв}}(p)$ (рис. IV-5, б) вычислим, воспользовавшись равенством

$$W_{yz, \text{экв}}(p) = \frac{y(p)}{z_{\text{экв}}(p)} = \frac{W_x(p)}{1 - W_x(p)W_p(p)} \quad (\text{IV, 7})$$

Передаточная функция системы по каналу задающего воздействия $W_{yz}(p)$ выразится следующим образом (рис. IV-5, в):

$$W_{yu}(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{W_p(p)W_x(p)}{1 - W_x(p)W_p(p)} \quad (\text{IV, 8})$$

Передаточная функция W_{yu} определяет влияние изменения заданного значения параметра u , поддерживаемое регулятором, на изменение выходной величины y системы, находящейся в установившемся состоянии. При этом принимается, что внешние возмущающие воздействия на объект, являются нулевыми ($z = 0$).

Отметим, что знаменатели передаточных функций $W_{yz}(p)$ и $W_{yu}(p)$ одинаковы, т.е. замкнутая система имеет один характеристический полином

$$H(p) = 1 - W_x(p)W_p(p) \quad (\text{IV, 9})$$

и одно характеристическое уравнение

$$1 - W_x(p)W_p(p) = 0 \quad (\text{IV, 10})$$

При одновременном воздействии возмущения z и изменении задания u , переходный процесс в рассматриваемой системе может быть найден по операторному уравнению:

$$y(p) = W_{yz}(p)z(p) + W_{yu}(p)u(p) \quad (\text{IV, 11})$$

Амплитудно-фазовые характеристики одноконтурной замкнутой системы по каналам $z \rightarrow y$ и $u \rightarrow y$ находят из соответствующих передаточных функций системы путем замены в них символа p на $i\omega$

$$W_{yz}(i\omega) = \frac{W_z(i\omega)}{1 - W_x(i\omega)W_p(i\omega)} \quad (\text{IV, 12})$$

$$W_{yu}(i\omega) = \frac{W_p(i\omega)W_x(i\omega)}{1 - W_x(i\omega)W_p(i\omega)} \quad (\text{IV, 13})$$

Обратные связи АСР. Системы, работающие по принципу отклонения, при действии возмущений z имеют прямую связь — цепочку звеньев объекта, по которой сигнал проходит от входа системы к ее выходу, и обратную связь (ОС), по которой сигнал проходит через автоматический регулятор и канал объекта $x \rightarrow y$ от выхода системы к ее входу. ОС системы, включающая

автоматический регулятор, называется главной ОС; для стабилизации работы системы она обязательно должна быть отрицательной. Это означает, что она должна действовать на объект в направлении, противоположном действию возмущения, т. е. если выходная величина объекта под действием возмущения отклонилась от заданного значения, то автоматический регулятор должен выработать такое воздействие, которое будет направлено на устранение или прекращение отклонения выходной величины. Обеспечить такое условие можно лишь при наличии в замкнутом контуре нечетного числа элементов обратного действия, т. е. таких элементов, возрастание входной величины которых приводит к уменьшению выходной. Число же элементов прямого действия (элементов, у которых увеличение входной величины приводит к возрастанию выходной) в замкнутом контуре может быть любым. На схемах входы элементов прямого действия обозначаются знаком «плюс», а входы элементов обратного действия — знаком «минус».

Рассмотрим формирование отрицательной обратной связи в двух АСР, которые вместе со своими структурными схемами приведены на рис. IV-6. Обе системы предназначены для поддержания постоянства уровня жидкости L в аппарате.

Объект регулирования (рис. IV-6, *в* и IV-6, *г*) имеет одну выходную (регулируемую) величину y и две входных величины, одна из которых (z) является возмущающим воздействием, а другая (x) используется в качестве регулирующей величины, т. е. в объекте имеется два канала прохождения сигналов $z \rightarrow y$ и $x \rightarrow y$. На вход регулятора направляют рассогласование между текущим y и заданным значениями регулируемой величины. При этом на выходе регулятора формируется регулирующее воздействие x . Обычно входные величины регулятора алгебраически

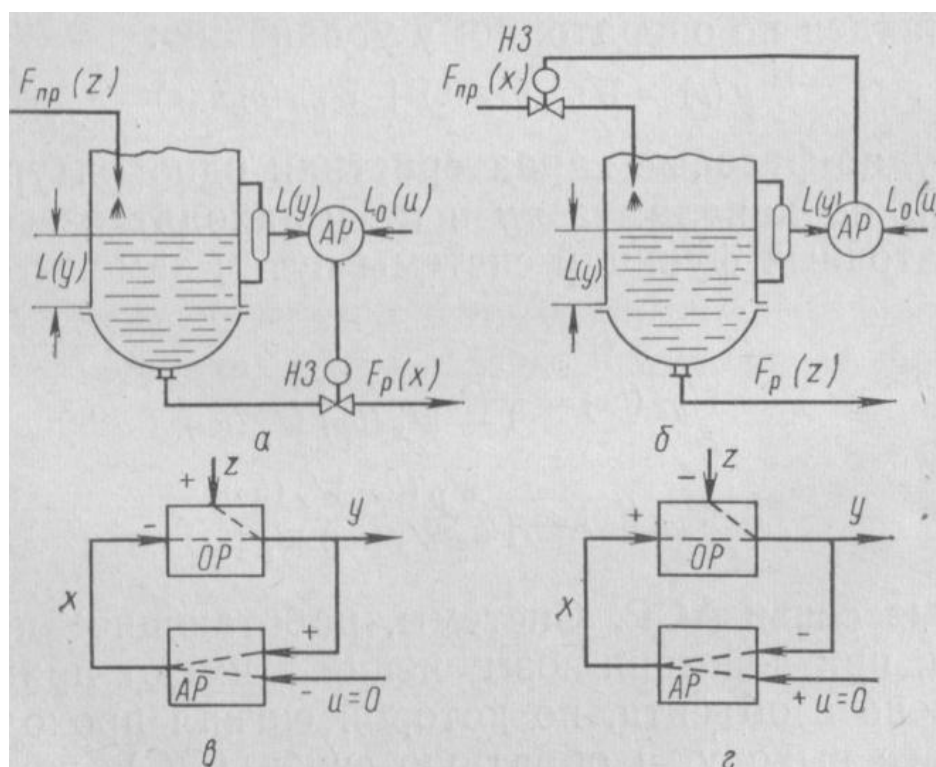


Рис. IV-6. Схемы АСР и структурные схемы при регулировании уровня с помощью регулятора прямого (*а*) и (*в*) и обратного (*б*) и (*г*) действия.

суммируются (сравниваются) и это рассогласование проходит по единственному каналу регулятора $(y-u) \rightarrow x$. На рис. IV-6,а регулятор воздействует на расход жидкости из аппарата (F_p), а на рис. IV-6,б — на приток жидкости в аппарат (F_{np}).

В первом случае увеличение F_p приводит к понижению L , т. е. объект представляет собой элемент обратного действия. Чтобы сформировать в этой системе отрицательную обратную связь, необходимо использовать регулятор прямого действия. Во втором случае увеличение F_{np} повышает уровень L , т. е. объект является элементом прямого действия, что требует установки в замкнутом контуре регулирования регулятора обратного действия.

В системах стабилизации заданное значение не изменяется во времени и $a = 0$, а возмущение z приводит к отклонению регулируемой величины от заданного значения. Поэтому сигнал в такой системе проходит только по каналу $z \rightarrow y$. При этом знак этого сигнала не влияет на формирование отрицательной обратной связи в замкнутом контуре.

При формировании отрицательной ОС в АСР в общем случае необходимо учитывать направленность действия всех входящих в нее элементов. Обычно измерительные преобразователи системы имеют прямое действие, а исполнительные устройства выбираются по технологическим соображениям (см. гл. III) и могут быть либо прямого (нормально закрытые НЗ), либо обратного действия (нормально открытые НО). Направленность действия регулятора выбирают с учетом работы объекта и направленности действия измерительного преобразователя и исполнительного устройства. Если в системе используется ИП прямого действия, то для выбора направленности действия регулятора можно воспользоваться данными табл. IV. 1.

Помимо главной в отдельных элементах АСР могут быть и дополнительные ОС, предназначенные для улучшения свойств этих элементов чаще всего регуляторов. Обычно дополнительные ОС также отрицательны. В реальных системах дополнительными ОС, как правило, охватывают цепочки с нестабильными звеньями, имеющими большие коэффициенты усиления

Таблица IV. 1. Характеристика регулятора, обеспечивающего отрицательную обратную связь в замкнутом контуре регулирования

Зависимость выходной величины объекта от входной	Характеристика регулятора, управляющего исполнительным устройством	
	нормально открытым (НО или воздух закрывает)	нормально закрытым (НЗ или воздух открывает)
$y = k_o x$ $y = -k_o x$	Прямая Обратная	Обратная Прямая

$k(k \rightarrow \infty)$. Найдем передаточную функцию $W(p)$ такого соединения. Согласно равенству (I,48)

$$W(p) = \frac{kW_{\text{пс}}(p)}{1 - kW_{\text{пс}}(p)[-W_{\text{ос}}(p)]} \quad (\text{IV, 14})$$

где $W_{\text{пс}}(p)$ и $W_{\text{ос}}(p)$ —передаточные функции стабильных звеньев прямой и обратной связей. Знак (—) в квадратных скобках знаменателя показывает, что ОС отрицательна. Разделим числитель и знаменатель выражения (IV,14) на k . Пренебрегая в знаменателе малым слагаемым $1/k$ и сокращая на $W_{\text{пс}}(p)$, получим

$$W(p) \approx 1/W_{\text{ос}}(p) \quad (\text{IV, 15})$$

Таким образом, при большом коэффициенте усиления цепи прямой связи динамические свойства системы определяются в основном передаточной функцией цепи обратной связи; такие системы называют предельными.

Этот важный вывод широко используется при формировании законов регулирования промышленных регуляторов. Прямые цепочки регуляторов обычно содержат нестабильные в работе усилители мощности. Поэтому для придания регуляторам конкретных динамических свойств в цепь обратной связи вводят звенья, имеющие заранее известную передаточную функцию, образуя тем самым предельную систему.

Наиболее часто используют жесткую, упругую и инерционную обратные связи. Их уравнения динамики имеют вид

$$x_{\text{вых}} = k_{\text{ос}} x_{\text{вх}} \quad (\text{IV, 16})$$

$$T_{\text{ос}} \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = k_{\text{ос}} T_{\text{ос}} \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} \quad (\text{IV, 17})$$

$$T_{\text{ос}} \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = k_{\text{ос}} x_{\text{вх}} \quad (\text{IV, 18})$$

Жесткая ОС представляет собой пропорциональное звено, упругая— реальное дифференцирующее, а инерционная — апериодическое звено 1-го порядка. Жесткая и инерционная обратные связи работают непрерывно, а упругая — только в переходном режиме. Находя передаточные функции этих обратных связей и подставляя их в уравнение (IV,15), получим передаточные функции соответственно П-, ПИ- и ПД-регуляторов.

Несмотря на большое разнообразие объектов химической технологии и применяемых для их регулирования автоматических устройств, общие принципы расчета и построения АСР одинаковы.

Расчет АСР и их анализ можно проводить теоретически и экспериментально. При теоретическом методе сначала составляют уравнение динамики АСР, которое является исходным материалом для анализа системы на ее устойчивость и качество переходного процесса.

При экспериментальном исследовании реальную систему подвергают типовым возмущающим воздействиям и анализируют реакцию системы на эти возмущения. При анализе на устойчивость систему можно подвергать возмущению как со стороны объекта (изменять z), так и со стороны регулятора (изменять u). При анализе на качество переходного процесса систему выводят из состояния равновесия, подавая возмущение на объект.

При промышленной эксплуатации одноконтурных АСР поступающее на них возмущение z изменяется непрерывно (изменение расхода сырья, его состава и др.), а задающее воздействие u обычно периодически изменяет оператор, осуществляющий перевод технологического объекта на новый режим работы. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать поведение АСР при действии возмущений z .

2. Составление уравнений динамики автоматических систем регулирования объектов химической технологии

Уравнения динамики автоматических систем регулирования составляют по их структурным схемам и уравнениям динамики или передаточным функциям отдельных ее элементов.

По уравнениям элементов уравнения динамики АСР составляют следующим образом. Сначала записывают систему уравнений отдельных элементов, входящих в систему, и, исключив из них промежуточные переменные, определяют зависимость между входными и выходными величинами системы. Одноконтурная замкнутая АСР с одной входной величиной имеет две такие зависимости, связывающие величины z , y и u , y .

Составим уравнение динамики АСР уровня жидкости в аппарате, являющемся устойчивым одноемкостным объектом; исполнительное устройство установлено на линии расхода жидкости из аппарата (рис. IV-7, а).

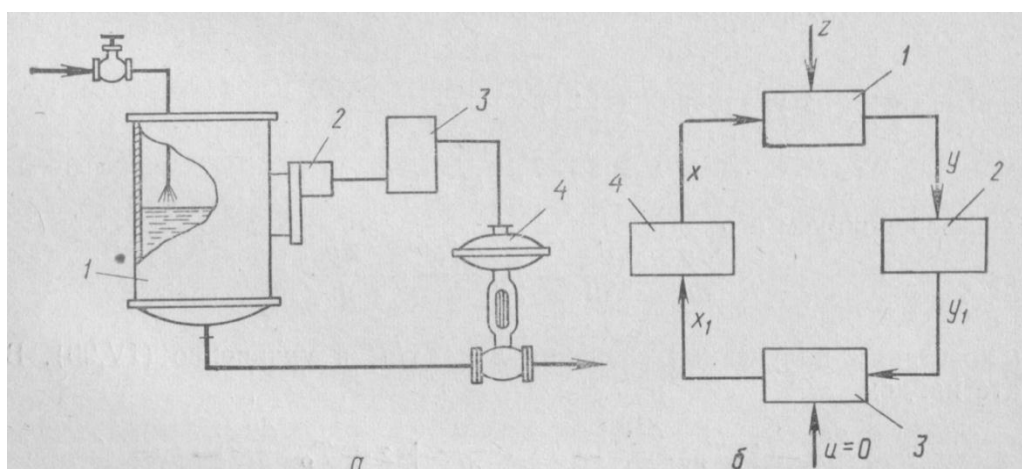


Рис. IV-7. Схема АСР уровня жидкости в резервуаре (а) и структурная схема (б):
1 — резервуар; 2 — измерительный преобразователь уровня; 3 — регулятор с вторичным прибором; 4 — исполнительное устройство.

Регулируемая величина — уровень жидкости — измеряется преобразователем, сигнал с выхода которого направляется на вход ПИ-регулятора. Выход регулятора — регулирующее воздействие — поступает на исполнительное устройства типа НЗ, изменяющее расход жидкости из аппарата. При увеличении уровня жидкости ее расход из аппарата должен увеличиваться, и наоборот. Структурная схема этой системы приведена на рис. IV-7,б.

Уравнения динамики отдельных элементов системы приведены в табл. IV.2; при этом принято, что заданное значение регулируемой величины постоянно и u равно нулю.

Исключим из системы уравнений табл. IV-2 переменные y_1 , x_1 и x . Для этого последовательно подставим y_1 из выражения (III,21) в уравнение (III,27)

$$x_1 = +k_{\text{ип}}k_p y + \frac{k_{\text{ип}}}{T_{\text{и}}} \int_0^t y dt \quad (\text{IV}, 19)$$

а найденное выражение для x_1 — в I,27; получим

$$T_{\text{иу}} \frac{dx}{dt} + x = k_{\text{ип}}k_p k_{\text{иу}} y + \frac{k_{\text{ип}}k_{\text{иу}}}{T_{\text{и}}} \int_0^t y dt \quad (\text{IV}, 20)$$

Далее выразим x из уравнения (II,21)

$$x = z - T_0 \frac{dy}{dt} - y$$

и продифференцируем его

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dz}{dt} - T_0 \frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{dy}{dt}$$

Затем подставим полученные значения x и dx/dt в уравнение (IV,20). В результате найдем

$$T_{\text{иу}} \frac{dz}{dt} - T_0 T_{\text{иу}} \frac{d^2 y}{dt^2} - T_{\text{иу}} \frac{dy}{dt} + z - T_0 \frac{dy}{dt} - y = k_{\text{ип}}k_p k_{\text{иу}} y + \frac{k_{\text{ип}}k_{\text{иу}}}{T_{\text{и}}} \int_0^t y dt \quad (\text{IV}, 21)$$

Продифференцируем полученное и сгруппируем слагаемые, содержащие y в левой части, а содержащие z — в правой части уравнения:

$$T_0 T_{иу} \frac{d^3 y}{dt^3} + (T_0 + T_{иу}) \frac{d^2 y}{dt^2} + (1 + k_{ип} k_p k_{иу}) \frac{dy}{dt} + \frac{k_{ип} k_{иу}}{T_{и}} y = T_{иу} \frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{dz}{dt} \quad (\text{IV}, 22)$$

Разделив все слагаемые на коэффициент при $y = k_{ип} k_{иу} / T_{и}$ получим уравнение динамики рассматриваемой системы

$$\frac{T_0 T_{иу} T_{и}}{k_{ип} k_{иу}} \frac{d^3 y}{dt^3} + \frac{(T_0 + T_{иу})}{k_{ип} k_{иу}} T_{и} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{(1 + k_{ип} k_p k_{иу})}{k_{ип} k_{иу}} T_{и} \frac{dy}{dt} + y = \frac{T_{и} T_{иу}}{k_{ип} k_{иу}} \frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{T_{и}}{k_{ип} k_{иу}} \frac{dz}{dt} \quad (\text{IV}, 23)$$

Окончательно представим уравнение (IV,23) в общем виде

$$a_0 \frac{d^3 y}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_2 T_{и} \frac{dy}{dt} + a_3 y = b_0 \frac{d^2 z}{dt^2} + b_1 \frac{dz}{dt} \quad (\text{IV}, 24)$$

Где

$$a_0 = \frac{T_0 T_{иу} T_{и}}{k_{ип} k_{иу}} \quad a_1 = \frac{(T_0 + T_{иу})}{k_{ип} k_{иу}} T_{и} \quad a_2 = \frac{(1 + k_{ип} k_p k_{иу})}{k_{ип} k_{иу}} T_{и} \quad a_3 = 1$$

$$b_0 = \frac{T_{и} T_{иу}}{k_{ип} k_{иу}} \quad b_1 = \frac{T_{и}}{k_{ип} k_{иу}}$$

По структурной схеме и передаточным функциям элементов

АСР можно составить уравнение динамики АСР, если известны структурная схема и уравнения динамики отдельных ее элементов. Для этого сначала находят передаточные функции элементов системы и по известным правилам преобразования структурных схем определяют передаточную функцию всей системы. По этой передаточной функции, найдя предварительно операторное уравнение системы, определяют ее дифференциальное уравнение динамики.

Для иллюстрации этих сведений составим уравнение динамики АСР температуры жидкости на выходе из теплообменника, воздействуя на подачу греющего пара (рис. IV-8, а). Температура жидкости на выходе из теплообменника (регулируемая величина) измеряется термоэлектрическим термометром, работающим в комплекте с преобразователем, на выходе которого формируется стандартный пневматический сигнал, подаваемый в качестве текущего значения температуры на ПИД-регулятор. На регулятор подается также постоянный сигнал, пропорциональный заданному значению температуры. Регулятор вырабатывает регулирующее воздействие и направляет его на, исполнительное устройство типа НО, установленное на линии подачи греющего пара в теплообменник.

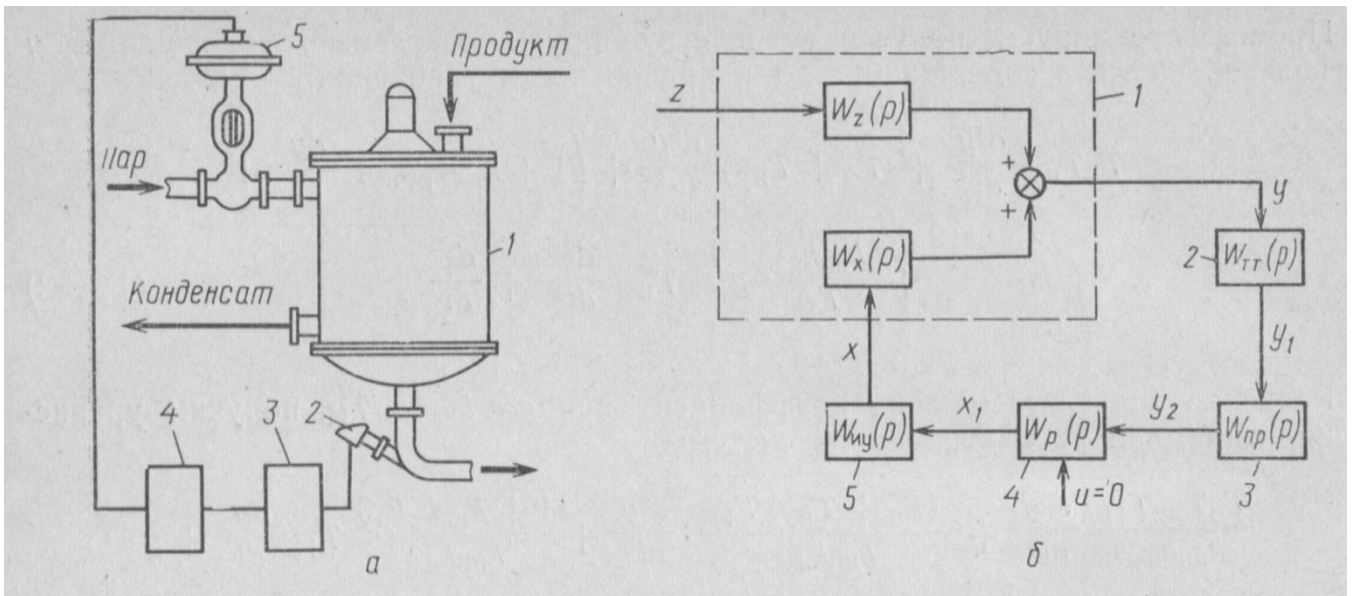


Рис. IV-8. Схема АСР температуры жидкости в теплообменнике (а) и структурная схема (б):

1 — теплообменник; 2 — термоэлектрический термометр; 3 — электропневмопреобразователь; 4 — регулятор с вторичным прибором; 5 — исполнительное устройство.

При наличии возмущения, например, при изменении температуры жидкости на входе в теплообменник, температура жидкости на выходе из него начнет изменяться. В этом случае регулятор должен подать на исполнительное устройство такую команду, чтобы при возрастании температуры жидкости на выходе подача греющего пара уменьшилась, а при падении — увеличилась. Структурная схема АСР температуры приведена на рис. IV-8, б.

Уравнения динамики отдельных элементов системы даны в табл. IV.3, при этом принято, что $u = 0$.

Согласно табл. IV.3 в замкнутом контуре системы четыре элемента прямого действия и только один элемент — исполнительное устройство типа НО — обратного действия. Поэтому обратная связь в системе отрицательна.

По уравнениям динамики элементов системы найдем их передаточные функции:

$$\left. \begin{aligned} W_x(p) &= \frac{k_0}{T_{01}^2 p^2 + T_{01} p + 1} \\ W_z(p) &= \frac{(1-k_0)(T_{03} p + 1)}{T_{01}^2 p^2 + T_{01} p + 1} \\ W_{TT}(p) &= \frac{k_{TT}}{T_{TT} p + 1} \\ W_{np}(p) &= k_{np} \\ W_p(p) &= k_p + \frac{1}{T_{ip} p} + T_{dp} \\ W_{ny}(p) &= -\frac{k_{ny}}{T_{ny} p + 1} \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV, 25})$$

Передаточная функция системы по каналу $z \rightarrow y$ в соответствии с ее структурной схемой (рис. IV-8, б) определяется равенством

$$W_{yz}(p) = \frac{W_z(p)}{1 - W_{TT}(p)W_{np}(p)W_p(p)W_{ny}(p)W_x(p)} \quad (\text{IV, 26})$$

Таблица IV.3. Уравнения динамики элементов АСР температуры жидкости на выходе из теплообменника

Элемент системы	Уравнение динамики	Номер уравнения
Теплообменник	$T_{01}^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_{02} \frac{dy}{dt} + y =$ $= k_0 x + (1 - k_0) \left(T_{03} \frac{dz}{dt} + z \right)$	(II,52)
Термоэлектрический термометр	$T_{т\tau} \frac{dy_1}{dt} + y_1 = k_{т\tau} y$	(III,11)
Электропневмопреобразователь	$y_2 = k_{пр} y_1$	(III,21)
ПИД-регулятор	$x_1 = k_p y_2 + \frac{1}{T_{и}} \int_0^t y_2 dt + T_{д} \frac{dy_2}{dt}$	(III,33)
Исполнительное устройство (ИУ)	$T_{иу} \frac{dx}{dt} + x = -k_{иу} x_1$	(I,27)

Подставляя в это уравнение передаточные функции (IV,25) и перемножая сомножители в числителе и знаменателе, получим

$$W_{yz}(p) = \frac{b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p}{a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5} \quad (\text{IV, 27})$$

Где

$$\begin{aligned}
 b_0 &= T_{03} T_{т\tau} T_{и} T_{иу} (1 - k_0) \\
 b_1 &= T_{и} (T_{03} T_{т\tau} + T_{03} T_{иу} + T_{т\tau} T_{иу}) (1 - k_0) \\
 b_2 &= T_{и} (T_{03} + T_{т\tau} + T_{иу}) (1 - k_0) \quad b_3 = T_{и} (1 - k_0) \\
 a_0 &= T_{01}^2 T_{т\tau} T_{и} T_{иу} \quad a_1 = T_{и} [T_{02} T_{иу} T_{т\tau} + T_{01}^2 (T_{т\tau} + T_{иу})] \\
 a_2 &= T_{и} [T_{01}^2 + T_{иу} T_{т\tau} + T_{02} T_{т\tau} + T_{02} T_{иу}] \\
 a_3 &= T_{и} (T_{т\tau} + T_{иу} + T_{02} + k_{т\tau} k_{пр} k_{иу} k_0 T_{д}) \\
 a_4 &= T_{и} (1 + k_{т\tau} k_{пр} k_{иу} k_0 k_p) \quad a_5 = k_{т\tau} k_{пр} k_{иу} k_0
 \end{aligned}$$

Отсюда при нулевых начальных условиях уравнение динамики в операторной форме имеет вид

$$(a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5) y(p) = (b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p) z(p) \quad (\text{IV, 28})$$

а дифференциальное уравнение динамики — соответственно вид

$$a_0 \frac{d^5 y}{dt^5} + a_1 \frac{d^4 y}{dt^4} + a_2 \frac{d^3 y}{dt^3} + a_3 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_4 \frac{dy}{dt} + a_5 y = b_0 \frac{d^4 z}{dt^4} + b_1 \frac{d^3 z}{dt^3} + b_2 \frac{d^2 z}{dt^2} + b_3 \frac{dz}{dt} \quad (\text{IV, 29})$$

По полученным уравнениям динамики АСР могут быть найдены временные характеристики, передаточные функции, характеристические уравнения и частотные характеристики с помощью тех же приемов, что были изложены в гл. I.

3. Исследование простых систем

Исследование работы простой системы сводится к построению ее переходной характеристики. По виду последней определяют устойчива ли система и удовлетворяет ли она заданному качеству регулирования. Для построения переходной характеристики решают уравнение динамики системы при единичном ступенчатом возмущающем воздействии.

Системы 1-го порядка. Исследуем одноконтурную замкнутую систему (см. рис. IV-6, а), состоящую из устойчивого объекта 1-го порядка и П-регулятора. Для нахождения уравнения динамики системы составим уравнения динамики объекта и регулятора со структурной схемой, приведенной на рис. IV-6, в; получим

$$T_0 \frac{dy}{dt} + y = -k_0 x + k_n z \quad (\text{IV, 30})$$

$$x = k_p y \quad (\text{IV, 31})$$

где y — регулируемая величина; x — регулирующее воздействие; z — возмущающее воздействие; T_0 — постоянная времени объекта; k_0 и k_n — коэффициенты передачи объекта по каналам регулирующего и возмущающего воздействий; k_p — коэффициент передачи регулятора; t — время.

Знак минус в правой части уравнения (IV,30) позволяет сформировать контур с отрицательной обратной связью.

Исключим из уравнений (IV,30) — (IV,31) переменную x

$$T_0 \frac{dy}{dt} + (k_0 k_p + 1)y = k_n z$$

Разделив слагаемые этого уравнения на коэффициент $(k_p k_0 + 1)$, получим уравнение динамики системы в общепринятой форме

$$\frac{T_0}{k_0 k_p + 1} \frac{dy}{dt} + y = \frac{k_n}{k_0 k_p + 1} z \quad (\text{IV, 32})$$

Решим это уравнение при единичном ступенчатом возмущении $z=1(t)$, и нулевых начальных условиях.

Общее решение $y_{\text{общ}}$ однородного уравнения, соответствующего уравнению (IV,32), имеет вид:

$$y_{\text{общ}} = C e^{\frac{k_0 k_p + 1}{T_0} t} \quad (\text{IV, 33})$$

где C — постоянная интегрирования.

Частное решение $y_{\text{част}}$ неоднородного уравнения (IV.32) при единичном возмущающем воздействии равно

$$y_{\text{част}} = \frac{k_n}{k_0 k_p + 1} 1(t) \quad (\text{IV, 34})$$

Следовательно, полное решение уравнения (IV,32) при $z=1(t)$ имеет вид

$$y = y_{\text{общ}} + y_{\text{част}} = \frac{k_n}{k_0 k_p + 1} + C e^{\frac{k_0 k_p + 1}{T_0} t} \quad (\text{IV, 35})$$

Постоянную интегрирования C определим из начальных условий: $t=+0$; $y=0$. Тогда

$$C = -\frac{k_n}{k_0 k_p + 1}$$

Подставляя значение C в уравнение (IV,35), окончательно получим

$$y = h(t) = \frac{k_n}{k_0 k_p} + 1 \left(1 - e^{-\frac{k_0 k_p + 1}{T_0} t} \right) \quad (\text{IV, 36})$$

Таким образом, переходная характеристика системы, состоящей из устойчивого объекта первого- порядка и П-регулятора, имеет экспоненциальный характер.

Аналогичным образом могут быть найдены уравнения динамики и переходные характеристики и других систем 1-го порядка. Они приведены в табл. IV.4.

Графики переходных характеристик систем 1-го порядка приведены в табл. IV.5 сплошными линиями, а объектов регулирования— пунктирными линиями.

Сравнение переходных характеристик устойчивого объекта 1-го порядка и системы, состоящей из того же объекта и П-регулятора, показывает, что скорости изменения их выходных величин в момент времени $t = +0$, т.е. сразу же после нанесения возмущения, одинаковы и равны

$$\frac{dy(+0)}{dt} = \frac{k_n}{T_0}$$

Со временем скорости изменения y объекта и системы постепенно уменьшаются до нуля. Это свидетельствует об их устойчивости. Переходный процесс в системе имеет такой же вид, что и у объекта, но заканчивается значительно быстрее и устанавливается на новом значении со статической ошибкой регулирования, равной

$$y_\infty = \frac{k_n}{k_0 k_p + 1} \quad (\text{IV, 37})$$

Она меньше, чем у объекта в $1/(1+k_0 k_p)$ раз. По сравнению с инерционностью объекта инерционность системы также уменьшается, поскольку их постоянные времени связаны соотношением

$$T_c = \frac{y_\infty}{\frac{dy(+0)}{dt}} = \frac{T_0}{k_0 k_p + 1} \quad (\text{IV, 38})$$

где T_c — постоянная времени системы.

Время регулирования системы t_{pc} , которое для экспоненциальной формы переходного процесса принимается равным примерно

$$t_{pc} \approx 3T_c = \frac{3T_0}{1 + k_0 k_p}$$

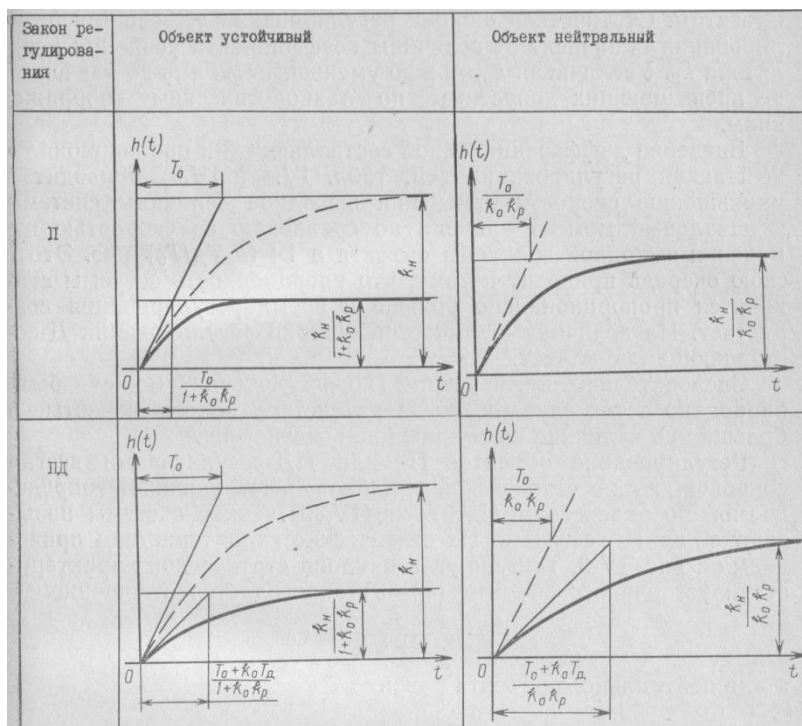
также будет меньше, чем время регулирования объекта

$$t_{p0} \approx 3T_0$$

Таблица IV.4. Уравнения динамики и переходные характеристики систем 1-го порядка

Наименование характеристик	Уравнение динамики и характеристика		
	П-регулятор	ПД-регулятор	ПД-регулятор
Уравнение динамики объекта	Для устойчивых объектов $T_o \frac{dy}{dt} + y = -k_o x + k_H z$		
То же, регулятора	Для нейтральных объектов $T_o \frac{dy}{dt} = -k_o x + k_H z$		
То же, системы	$x = k_p y$ $\frac{T_o}{1 + k_o k_p} \cdot \frac{dy}{dt} + y = \frac{T_o + k_o T_D}{k_o k_p} \cdot \frac{dy}{dt} + y = \frac{k_H}{k_o k_p} z$ $x = k_p y + T_D \frac{dy}{dt}$ $\frac{T_o + k_o T_D}{k_o k_p} \cdot \frac{dy}{dt} + y = \frac{k_H}{k_o k_p} z$		
Начальные условия	$y(+0) = 0$		
Частное решение	$y_{\text{част}} = \frac{k_H}{1 + k_o k_p} 1(t) = \frac{k_H}{k_o k_p} 1(t)$		
Характеристическое уравнение и его корень	$\frac{T_o}{1 + k_o k_p} p + 1 = 0$ $p = -\frac{1 + k_o k_p}{T_o}$		
Переходные характеристики	$h(t) = \frac{k_H}{1 + k_o k_p} (1 - e^{pt})$		

Таблица IV.5. Графики переходных характеристик объектов (пунктир) и систем (сплошная линия) 1-го порядка



Следовательно, использование П-регуляторов на устойчивых объектах 1-го порядка приводит к улучшению качества регулирования. Показатели качества регулирования (статическая ошибка регулирования и время регулирования) уменьшаются с увеличением коэффициента усиления регулятора.

Установка П-регулятора на нейтральном объекте 1-го порядка приводит к устойчивому переходному процессу со статической ошибкой регулирования

$$y_{\infty} = \frac{k_H}{k_0 k_p} \quad (\text{IV, 39})$$

и постоянной времени

$$T_c = \frac{T_0}{k_0 k_p} \quad (\text{IV, 40})$$

Скорости изменения выходных величин объекта и системы в момент времени $t=+0$ одинаковы и равны k_H/T_0 .

Таким образом, применение П-регуляторов в системах 1-го порядка стабилизирует переходный процесс и улучшает его статические и динамические показатели качества по сравнению с объектом. Статическая ошибка регулирования y_∞ и время регулирования t_p зависят от величины коэффициента усиления регулятора k_p . Увеличивая k_p , можно уменьшить y_∞ и t_p до значений, не превышающих допустимые по технологическим соображениям.

Введение дифференциальной составляющей в пропорциональный закон регулирования (см. табл. IV.4 и IV.5) приводит к уменьшению скорости изменения выходной величины системы в начальный момент времени по сравнению со скоростью изменения выходной величины объекта в $1 + (k_0 T_d / T_0)$ раз. Это в свою очередь приводит к тому, что инерционность системы становится пропорционально больше и время регулирования возрастает. На величину статической ошибки регулирования Д-составляющая не влияет.

Следовательно, применение ПД-регуляторов может быть оправдано в тех случаях, когда на систему подаются частые и большие по величине возмущающие воздействия.

Регулирование объектов П- или ПД-регуляторами всегда сопровождается статической ошибкой регулирования, определяемой по равенствам (IV,37) и (IV,39). Такие системы называют статическими. Их статические характеристики приведены на рис. IV-9. Тангенс угла наклона статической характеристики устойчивого объекта ($k_p = 0$) определяется отношением

$$\frac{y_\infty}{z} = \frac{k_n}{1 + k_0 k_p} = k_n$$

а для нейтрального объекта равен

$$\frac{y_\infty}{z} = \frac{k_n}{k_0 k_p} = \infty$$

При включении регулятора ($k_p > 0$) наклон статической характеристики системы уменьшается. С увеличением

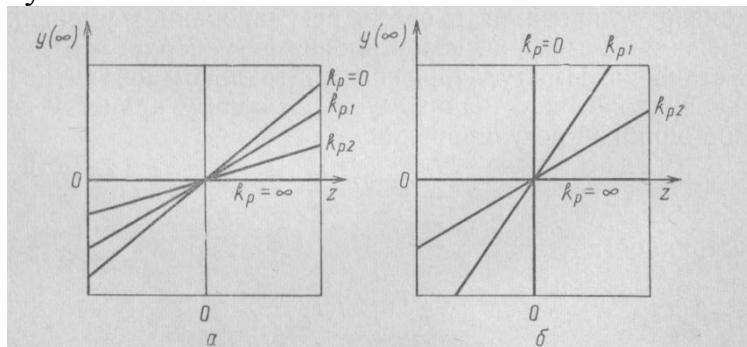


Рис. IV-9. Статические характеристики систем с устойчивым (а) и нейтральным (б) объектами при различных значениях k_p .

коэффициента усиления регулятора k_p (на рисунке $0 < k_{p1} < k_{p2} < \infty$) статическая характеристика системы поворачивается по часовой стрелке, уменьшая статизм системы. Теоретически при $k_p = \infty$ статическая ошибка регулирования становится равной нулю.

В действительности максимальное значение коэффициента усиления регулятора ограничивается реальной конструкцией регулятора; кроме того при большом значении k_p начинает сказываться влияние второстепенных факторов, не учитываемых при выводе уравнения динамики (запаздывание при передаче сигналов, наличие люфтов и зазоров в кинематических парах и др.). Влияние этих факторов приводит к колебательному процессу и увеличению времени регулирования.

Системы, у которых при изменении возмущающего воздействия z статическая ошибка регулирования равна нулю, называются астатическими. В координатах y_∞, z их статическая характеристика представляет собой горизонтальную прямую.

Астатическая система должна содержать в своей структуре астатические (интегрирующие) звенья, причем, если они находятся в прямой цепи передачи воздействия или в цепи обратной связи, то система обладает астатизмом, а если они находятся в цепи, охваченной обратной связью, то система будет статической.

Системы 2-го порядка. К ним относятся, например, системы с устойчивым объектом первого порядка и И-, ПИ- или ПИД-регуляторами. Аналитический анализ таких систем сложнее.

В качестве примера разберем случай, когда система состоит из устойчивого объекта 1-го порядка и ПИ-регулятора, уравнения динамики которых имеют вид:

$$T_0 \frac{dy}{dt} + y = -k_0 x + k_n z$$

$$x = k_p y + \frac{1}{T_i} \int_0^t y dt$$

где T_i — время интегрирования регулятора.

Исключая из уравнений динамики объекта и регулятора переменную x , получим уравнение динамики системы

$$\frac{T_0 T_i}{k_0} \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{1 + k_0 k_p}{k_0} T_i \frac{dy}{dt} + y = \frac{k_n}{k_0} T_i \frac{dz}{dt} \quad (\text{IV, 41})$$

Найдем переходную характеристику системы, т. е. ее реакцию на единичное возмущение $z=1(t)$, при условии, что до нанесения возмущения система имела нулевые начальные условия $y(-0)=0$ и $dy(-0)/dt=0$. Так как правая часть уравнения (IV,41) содержит производную, начальные условия системы необходимо привести к моменту $t = +0$. Учитывая порядок левой ($n = 2$) и правой ($m = 1$) частей уравнения (IV,41), согласно табл. 1.2 имеем

$$y(+0) = y(-0) = 0 \quad (\text{IV, 42})$$

$$\frac{dy(+0)}{dt} - \frac{dy(-0)}{dt} = \frac{dy(+0)}{dt} = \frac{b_0}{a_0} 1(t) = \frac{k_n}{T_0} \quad (\text{IV, 43})$$

Переходную характеристику системы будем находить с использованием операционного исчисления. Для получения решения преобразуем все слагаемые уравнения (IV,41) по Лапласу с учетом начальных условий. По определению и в соответствии с выражениями (5), (6), (16), приведенными в Приложении 1, имеем

$$\begin{aligned} y(t) &\leftarrow: Y(p) \\ \frac{dy(t)}{dt^2} &\leftarrow: pY(p) - y(+0) = pY(p) \\ \frac{d^2y(t)}{dt^2} &\leftarrow: p^2Y(p) - py(+0) + \frac{dy(+0)}{dt} = p^2Y(p) - \frac{k_H}{T_0} \\ \frac{dz(t)}{dt} &= \frac{d1(t)}{dt} \leftarrow: pZ(p) - z(+0) = \frac{p}{p} - 1 = 0 \end{aligned}$$

Учитывая эти соответствия, а также выражение (4), приведенное в Приложении 1, получим

$$p^2Y(p) - \frac{k_H}{T_0} + \frac{1 + k_0k_p}{T_0}pY(p) + \frac{k_0}{T_0T_H}Y(p) = 0$$

Откуда изображение искомой величины равно

$$Y(p) = \frac{k_H}{T_0} \frac{1}{p^2 + \frac{1+k_0k_p}{T_0}p + \frac{k_0}{T_0T_H}} \quad (\text{IV, 44})$$

Для нахождения оригинала $y(t)$ по этому изображению из характеристического уравнения системы

$$p^2 + \frac{1+k_0k_p}{T_0}p + \frac{k_0}{T_0T_H} = 0 \quad (\text{IV, 45})$$

определим его корни. Они равны

$$p_{1,2} = \frac{-(1+k_0k_p) \pm \sqrt{(1+k_0k_p)^2 - \left(\frac{4T_0k_0}{T_H}\right)}}{2T_0} \quad (\text{IV, 46})$$

Если $(k_0k_p+1)^2 > 4k_0T_0/T_H$, то оба корня вещественные и разные. В этом случае выражение (IV,44) приводят к форме

$$Y(p) = \frac{k_0}{T_0} \frac{1}{(p - p_1)(p - p_2)}$$

и, учитывая соотношение (28). Приложения 1, получают

$$y(t) = \frac{k_H}{T_0} \frac{e^{p_1t} - e^{p_2t}}{p_1 - p_2}$$

Вычислив разность $p_1 - p_2$

$$p_1 - p_2 = \frac{\sqrt{(1 + k_0k_p)^2 - \left(\frac{4T_0k_0}{T_H}\right)}}{T_0}$$

окончательно получим

$$y(t) = \frac{k_H}{\sqrt{(1+k_0k_p)^2 - \left(\frac{4T_0k_0}{T_H}\right)}} (e^{p_1t} - e^{p_2t}) \quad (\text{IV, 47})$$

В данном случае переходный процесс носит аperiодический характер.

При $(k_0 k_p + 1)^2 < 4k_0 T_0 / T_{II}$ корни характеристического уравнения (IV,45) комплексные сопряженные

$$p_{1,2} = \alpha \pm i\beta$$

Где

$$\alpha = -\frac{k_0 k_p + 1}{2T_0} \quad \beta = \frac{\sqrt{4k_0 \frac{T_0}{T_{II}} - (1 + k_0 k_p)^2}}{2T_0}$$

В этом случае выражение (IV,44) представим в виде

$$Y(p) = \frac{k_H}{T_0} \frac{1}{(p - \alpha)^2 + \beta^2}$$

и, принимая во внимание соотношение (31), приведенное в Приложении, получим

$$y(t) = \frac{k_H}{T_0 \beta} e^{-\alpha t} \sin \beta t$$

Или

$$y(t) = \frac{k_H}{T_0} \cdot \frac{2k_H}{\sqrt{4k_0 \frac{T_0}{T_{II}} - (1 + k_0 k_p)^2}} \times e^{-\frac{1 + k_0 k_p}{2T_0} t} \sin \frac{\sqrt{4k_0 \frac{T_0}{T_{II}} - (1 + k_0 k_p)^2}}{2T_0} t \quad (\text{IV, 48})$$

Уравнение (IV,48) описывает колебательный процесс.

Если $(k_0 k_p + 1)^2 = 4k_0 T_0 / T_{II}$, то корни характеристического уравнения вещественные и равные

$$p_{1,2} = -\frac{1 + k_0 k_p}{2T_0} = -a$$

Тогда, представив выражение (IV.44), в виде

$$Y(p) = \frac{k_H}{T_0} \cdot \frac{1}{(p + a)^2}$$

и учитывая соотношение (29), приведенное в Приложении, получим

$$y(t) = \frac{k_H}{T_0} t e^{-at}$$

Или

$$y(t) = \frac{k_H}{T_0} t e^{-\frac{1 + k_0 k_p}{2T_0} t} \quad (\text{IV, 49})$$

Это граничный аperiodический процесс.

Таким образом, при возмущении $z=1(t)$ переходный процесс в исследуемой системе описывается уравнениями (IV,47) — (IV,49) и может иметь разный характер (рис. IV-10). Во всех трех случаях статическая ошибка регулирования y_∞ равна нулю, т. е. введение в систему ПИ-регулятора превращает ее в астатическую.

Таблица IV.6. Уравнения динамики и переходные характеристики систем с устойчивым объектом 1-го порядка

Наименование характеристики	Уравнение динамики и характеристики		
	И-регулятор	ПИ-регулятор	ПИД-регулятор
Уравнение динамики объекта		$T_o \frac{dy}{dt} + y = -k_o x + k_H z$	
То же, регулятора	$x = \frac{1}{T_H} \int_0^t y dt$	$x = k_P y + \frac{1}{T_H} \int_0^t y dt$	$x = k_P y + \frac{1}{T_H} \int_0^t y dt + T_D \frac{dy}{dt}$
То же, системы	$\frac{T_o T_H}{k_o} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{T_o T_H}{k_o} \frac{dy}{dt} + y =$ $+\frac{T_H}{k_o} \frac{dy}{dt} + y =$ $= \frac{k_H}{k_o} T_H \frac{dz}{dt}$	$\frac{T_o T_H}{k_o} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{1 + k_o k_P}{k_o} T_H \frac{dy}{dt} + y =$ $= \frac{k_H}{k_o} T_H \frac{dz}{dt}$	$(T_o + k_o T_D) \frac{T_H}{k_o} \frac{d^2 y}{dt^2} +$ $+\frac{1 + k_o k_P}{k_o} T_H \frac{dy}{dt} + y = \frac{k_H}{k_o} T_H \frac{dz}{dt}$
Начальные условия	$y(+0) = 0;$	$\frac{dy(+0)}{dt} = \frac{k_H}{T_o}$	$y(+0) = 0; \frac{dy(+0)}{dt} = \frac{k_H}{T_o + k_o T_D}$
Частное решение		$y_{\text{част}} = \frac{k_H}{k_o} T_o \frac{d1(t)}{dt} = 0$	
Характеристическое уравнение и его корни	$\frac{T_o T_H}{k_o} p^2 +$ $+\frac{T_H}{k_o} p + 1 = 0$	$\frac{T_o T_H}{k_o} p^2 + \frac{1 + k_o k_P}{k_o} T_H p + 1 = 0$	$(T_o + k_o T_D) \frac{T_H}{k_o} p^2 + \frac{1 + k_o k_P}{k_o} T_H p + 1 = 0$

$p_{1,2} =$	$\frac{-1 \pm \sqrt{1 - 4k_0 \frac{T_0}{T_H}}}{2T_0}$	$\frac{-(1 + k_0 k_p) \pm \sqrt{(1 + k_0 k_p)^2 - \frac{4k_0 T_0}{T_H}}}{2T_0}$	$\frac{-(1 + k_0 k_p) \pm \sqrt{(1 + k_0 k_p)^2 - 4(T_0 + k_0 T_D) \frac{k_0}{T_H}}}{2(T_0 + k_0 T_D)}$
Переходные характеристики для случая, когда корни вещественные разные	$1 > 4k_0 \frac{T_0}{T_H}$	$(1 + k_0 k_p)^2 > 4k_0 \frac{T_0}{T_H}$	$(1 + k_0 k_p)^2 > 4(T_0 + k_0 T_D) \frac{k_0}{T_H}$
То же, вещественные равные	$C_1 = \frac{k_H}{\sqrt{1 - \frac{4k_0 T_0}{T_H}}}$ $1 = 4k_0 \frac{T_0}{T_H}$	$h(t) = C_1 (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}); \quad (p_1 > p_2)$ $C_1 = \frac{k_H}{\sqrt{(1 + k_0 k_p)^2 - \frac{4k_0 T_0}{T_H}}}$ $(1 + k_0 k_p)^2 = 4k_0 \frac{T_0}{T_H}$	$C_1 = \frac{k_H}{\sqrt{(1 + k_0 k_p)^2 - 4(T_0 + k_0 T_D) \frac{k_0}{T_H}}}$ $(1 + k_0 k_p)^2 = 4(T_0 + k_0 T_D) \frac{k_0}{T_H}$
То же, комплексные сопряженные	$1 < 4k_0 \frac{T_0}{T_H}$	$h(t) = C_2 e^{pt}; \quad (p_1 = p_2 = p)$ $C_2 = \frac{k_H}{T_0}$	$C_2 = \frac{k_H}{T_0 + k_0 T_D}$ $(1 + k_0 k_p)^2 < 4(T_0 + k_0 T_D) \frac{k_0}{T_H}$
	$A = \frac{2k_H}{\sqrt{4k_0 \frac{T_0}{T_H} - 1}}$ $\alpha = -\frac{1}{2T_0}$	$h(t) = Ae^{\alpha t} \sin \beta t;$ $A = \frac{2k_H}{\sqrt{4k_0 \frac{T_0}{T_H} - (1 + k_0 k_p)^2}}$ $\alpha = -\frac{1 + k_0 k_p}{2T_0}$	$A = \frac{2k_H}{\sqrt{4(T_0 + k_0 T_D) \frac{k_0}{T_H} - (1 + k_0 k_p)^2}}$ $\alpha = -\frac{1 + k_0 k_p}{2(T_0 + k_0 T_D)}$
	$\beta = \frac{\sqrt{4k_0 \frac{T_0}{T_H} - 1}}{2T_0}$	$\beta = \frac{\sqrt{4k_0 \frac{T_0}{T_H} - (1 + k_0 k_p)^2}}{2T_0}$	$\beta = \frac{\sqrt{4(T_0 + k_0 T_D) \frac{k_0}{T_H} - (1 + k_0 k_p)^2}}{2(T_0 + k_0 T_D)}$

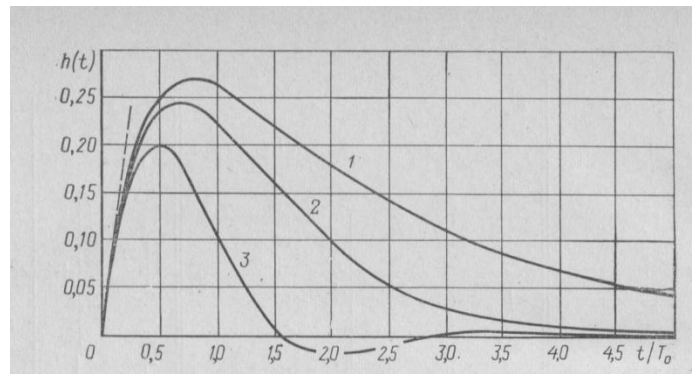


Рис. IV-10. Переходная характеристика системы 2-го порядка, снабженной ПИ-регулятором, в случае аperiodического (1), граничного аperiodического (2) и колебательного (3) переходных процессов.

Уравнения динамики и переходные характеристики для систем 2-го порядка, состоящих из устойчивого объекта 1-го порядка, снабженного И-, ПИ- или ПИД-регулятором, сведены в табл. IV.6.

Из уравнений переходных характеристик следует, что в этих системах возникают переходные процессы таких же форм, что и приведенные на рис. IV-10.

При регулировании устойчивого объекта 1-го порядка И - регулятором исчезает статическая ошибка регулирования и система превращается в астатическую.

При аperiodическом переходном процессе его длительность в основном определяется экспонентой с большей постоянной времени, равной

$$\frac{2T_0}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{4k_0T_0}{T_{\text{и}}}\right)}}$$

которая более чем в два раза превышает постоянную времени объекта T_0 . Увеличение времени интегрирования $T_{\text{и}}$ затягивает продолжительность переходного процесса. Увеличение быстродействия регулятора (уменьшение $T_{\text{и}}$) вплоть до значения, равного $T_{\text{и}}=4k_0T_0$, приводит к уменьшению длительности переходного процесса и некоторому снижению динамической ошибки регулирования.

Последующее уменьшение $T_{\text{и}}$ и приводит к колебательности переходного процесса. Причем с уменьшением $T_{\text{и}}$ колебательность увеличивается, так как уменьшается период колебаний

$$T_{\text{п}} = 2\pi \frac{2T_0}{\sqrt{\left(\frac{4k_0T_0}{T_{\text{и}}}\right) - 1}}$$

Однако одновременно с этим уменьшается и амплитуда колебаний, что несколько снижает динамическую ошибку регулирования. Длительность переходного процесса, определяемая интенсивностью затухания колебаний, зависит только от инерционных

свойств объекта; постоянная времени экспоненты равна $2T_0$. Таким образом, наряду с улучшением статических свойств в системе с И-регулятором наблюдается ухудшение динамических свойств.

Введение П-составляющей уменьшает длительность переходного процесса, так как постоянные времени определяющих ее экспонент, во всех случаях имеют меньшее значение, чем при использовании И-регулятора. Причем это влияние усиливается с увеличением коэффициента усиления регулятора k_p . При ПИ-регулировании динамическая ошибка всегда меньше, чем при И-регулировании. Так при равенстве $(1 + k_0 k_p)^2 = 4k_0 T_0 / T_{II}$ она меньше в $(1 + k_0 k_p)$ раз. С увеличением k_p период колебаний повышается, т. е. колебательность переходного процесса уменьшается. Следовательно, применение ПИ-регулятора наряду с улучшением статических свойств системы приводит к улучшению всех показателей качества по сравнению с системой, использующей И-регулятор. Причем, это улучшение зависит от значения коэффициента усиления регулятора k_p .

Введение Д-составляющей в ПИ-закон регулирования не нарушает астатизма системы. Влияние Д-составляющей, как и в случае с ПД-регулятором, выражается в том, что в первый момент времени после нанесения возмущения скорость отклонения выходной величины системы с ПИД-регулятором в $(1 + k_0 T_D / T_{II})$ раз меньше, чем при ПИ-регулировании. А поскольку выходная величина системы после нанесения возмущения и окончания переходного процесса должна строго вернуться к заданному значению, динамическая ошибка, и время регулирования будут иметь значительно меньшие значения, чем при ПИ-регулировании. Колебательность переходного процесса при этом также уменьшается. Таким образом, введение Д-составляющей в ПИ-закон регулирования улучшает все показатели качества переходного процесса.

В табл. IV.7 приведены уравнения динамики и переходные характеристики систем 2-го порядка, состоящих из устойчивого объекта 2-го порядка с П- или ПД-регулятором.

В системах 2-го порядка с устойчивыми объектами переходные процессы обладают более высокими показателями качества, чем с нейтральными объектами. В системе же, включающей нейтральный объект 1-го порядка и И-регулятор, возникает гармонический, колебательный процесс

$$h(t) = \frac{k_H}{\sqrt{k_0 \frac{T_0}{T_{II}}}} \sin \sqrt{\frac{k_0}{T_0 T_{II}}} t \quad (\text{IV, 50})$$

с амплитудой и частотой колебаний соответственно равными

$$\frac{k_H}{\sqrt{k_0 \frac{T_0}{T_{II}}}} \quad \text{и} \quad \sqrt{\frac{k_0}{T_0 T_{II}}}$$

т.е. такая система находится на границе устойчивости.

Таблица IV.7. Уравнения динамики и переходные характеристики систем с устойчивым объектом 2-го порядка

Наименование характеристики	Уравнение динамики и характеристики	
	П-регулятор	ПД-регулятор
Уравнение динамики объекта	$T_{o1}^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_{o2} \frac{dy}{dt} + y = -k_o x + k_{Hz}$	
То же, регулятора	$x = k_p y$	$x = k_p y + T_{\Delta} \frac{dy}{dt}$
То же, системы	$\frac{T_{o1}^2}{1 + k_o k_p} \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{T_{o2}}{1 + k_o k_p} \frac{dy}{dt} + y = \frac{k_H}{1 + k_o k_p} z$	$\frac{T_{o1}^2}{1 + k_o k_p} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{T_{o2} + k_o T_{\Delta}}{1 + k_o k_p} \frac{dy}{dt} + y = \frac{k_H}{1 + k_o k_p} z$
Начальные условия	$y(+0) = 0;$	$\frac{dy(+0)}{dt} = 0$
Частное решение	$y_{\text{част}} = \frac{k_H}{1 + k_o k_p} z$	
Характеристическое уравнение и его корни	$\frac{T_{o1}^2}{1 + k_o k_p} p^2 + \frac{T_{o2}}{1 + k_o k_p} p + 1 = 0$ $p_{1,2} = \frac{-T_{o2} \pm \sqrt{T_{o2}^2 - 4T_{o1}^2(1 + k_o k_p)}}{2T_{o1}^2}$	$\frac{T_{o1}^2}{1 + k_o k_p} p^2 + \frac{T_{o2} + k_o T_{\Delta}}{1 + k_o k_p} p + 1 = 0$ $p_{1,2} = \frac{-(T_{o2} + k_o T_{\Delta}) \pm \sqrt{(T_{o2} + k_o T_{\Delta})^2 - 4T_{o1}^2(1 + k_o k_p)}}{2T_{o1}^2}$

Переходные характеристики для случаев, когда корни вещественные разные

$$T_{02}^2 > 4T_{01}^2(1 + k_0k_p) \quad \left| \quad (T_{02} + k_0T_{\Pi})^2 > 4T_{01}^2(1 + k_0k_p) \right.$$

$$h(t) = \frac{k_H}{1 + k_0k_p} \left(1 + \frac{p_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - \frac{p_1}{p_1 - p_2} e^{p_2 t} \right)$$

$$p_1 - p_2 = \frac{\sqrt{T_{02}^2 - 4T_{01}^2(1 + k_0k_p)}}{T_{01}} \quad \left| \quad p_1 - p_2 = \frac{\sqrt{(T_{02} + k_0T_{\Pi})^2 - 4T_{01}^2(1 + k_0k_p)}}{T_{01}} \right.$$

$$T_{02}^2 = 4T_{01}^2(1 + k_0k_p)$$

$$(T_{02} + k_0T_{\Pi})^2 = 4T_{01}^2(1 + k_0k_p)$$

$$(p_1 = p_2 = p)$$

$$h(t) = \frac{k_H}{1 + k_0k_p} [1 - (1 - pt)e^{pt}];$$

$$p = -\frac{T_{02}}{2T_{01}^2}$$

$$p = -\frac{T_{02} + k_0T_{\Pi}}{2T_{01}^2}$$

$$T_{02}^2 < 4T_{01}^2(1 + k_0k_p)$$

$$(T_{02} + k_0T_{\Pi})^2 < 4T_{01}^2(1 + k_0k_p)$$

$$h(t) = \frac{k_H}{1 + k_0k_p} \left[1 - e^{-\frac{t}{T}} \left(\cos \omega t + \frac{1}{T\omega} \sin \omega t \right) \right]; \quad (p_{1,2} = \alpha \pm i\beta)$$

$$T = -\frac{1}{\alpha} = \frac{2T_{01}^2}{T_{02}}$$

$$T = -\frac{1}{\alpha} = \frac{2T_{01}^2}{T_{02} + k_0T_{\Pi}}$$

$$\omega = \beta = \frac{\sqrt{4T_{01}^2(1 + k_0k_p) - T_{02}^2}}{2T_{01}^2}$$

$$\omega = \beta = \frac{\sqrt{4T_{01}^2(1 + k_0k_p) - (T_{02} + k_0T_{\Pi})^2}}{2T_{01}^2}$$

То же, вещественные равные

То же, комплексные сопряженные

Выбор регуляторов. Из анализа рассмотренных выше простых систем вытекают некоторые общие замечания по выбору регуляторов.

П-регулятор можно применять для работы как на устойчивых, так и на нейтральных объектах, если допустима статическая ошибка регулирования. При работе с объектами 1-го порядка П-регулятор формирует апериодический переходный процесс, а — с объектами 2-го порядка — либо апериодический, либо колебательный переходный процесс.

Введение И-составляющей в закон регулирования усложняет динамику переходных процессов, повышая порядок уравнения динамики системы. При этом возможно появление апериодических и колебательных процессов. Наличие И-составляющей гарантирует отсутствие статической ошибки регулирования. И-регуляторы применяют для работы только на устойчивых объектах, когда допустимы большие значения динамической ошибки и времени регулирования.

ПИ-регуляторы широко используются для работы на устойчивых и нейтральных объектах, когда статическая ошибка регулирования должна быть равна нулю. Показатели качества переходного процесса улучшают, увеличивая коэффициент усиления регулятора k_p .

Введение Д-составляющей значительно уменьшает скорость отклонения регулируемой величины от заданного значения; если имеется И-составляющая, это способствует быстрому протеканию переходного процесса при небольшом динамическом отклонении.

4. Устойчивость автоматических систем регулирования химико-технологических объектов

Устойчивость системы определяется характером ее свободного движения, которое описывается однородным дифференциальным уравнением динамики. Для системы n -ого порядка оно имеет вид:

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = 0 \quad (\text{IV, 51})$$

где y — выходная величина; $a_1, a_2, \dots, a_n$ — постоянные коэффициенты; t — время.

Исследование системы на устойчивость требует решения этого уравнения, которое может быть представлено в следующем виде:

$$y(t) = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t} \quad (\text{IV, 52})$$

где A_k — постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий; p_k — корни характеристического уравнения вида

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0 \quad (\text{IV, 53})$$

Однако достаточно просто решаются дифференциальные уравнения только 1-го и 2-го порядков. Решение уравнений более высокого порядка требует преодоления определенных трудностей, возрастающих с повышением порядка уравнения. Значительно проще можно найти корни характеристических уравнений. Поэтому целесообразно выяснить зависимость между устойчивостью системы и значением корней ее характеристического уравнения.

Устойчивость системы и корни характеристического уравнения. Расположение корней характеристического уравнения позволяет судить об устойчивости системы. Если характеристическое уравнение имеет только вещественные и разные корни, то характер изменения каждой составляющей

$$y_k(t) = A_k e^{p_k t}$$

зависит от знака корня характеристического уравнения p_k . При $p_k = 0$ составляющая $y_k(t)$ принимает постоянное по времени значение, равное A_k . Если корень характеристического уравнения p_k положителен, то с течением времени соответствующая ему составляющая переходного процесса $y_k(t)$ увеличивается до бесконечности; если же корень p_k отрицателен, то — стремится к нулю (рис. IV-11).

В случае, когда характеристическое уравнение кроме вещественных имеет сопряженные комплексные корни

$$p_{k,k+1} = \alpha_k \pm i\beta_k$$

каждой паре таких корней в решении (IV,52) соответствуют составляющие вида

$$A_k e^{(\alpha_k + i\beta_k)t} + A_{k+1} e^{(\alpha_k - i\beta_k)t} = A e^{\alpha_k t} \sin(\beta_k t + \varphi) \quad (\text{IV, 54})$$

где A и φ — новые постоянные интегрирования.

Напомним, что только при наличии сопряженных комплексных корней все коэффициенты характеристического уравнения действительны. Составляющая переходного процесса (IV,54) имеет колебательный характер.

Изменение амплитуды колебательной составляющей во времени зависит от знака вещественной части α_k комплексных корней. При $\alpha_k = 0$ амплитуда колебательного процесса не изменяется во времени, т.е. наблюдается гармонический колебательный процесс. Если вещественная часть пары комплексных корней положительна, то амплитуда колебательного процесса с течением времени возрастает до бесконечности, если же вещественная часть отрицательна, то — уменьшается и стремится к нулю (рис. IV-12).

Система устойчива лишь в случае, когда все слагаемые $y_k(t)$ в решении (IV,52) со временем стремятся к нулю. Если все корни характеристического уравнения системы вещественные отрицательные или комплексные с отрицательной вещественной

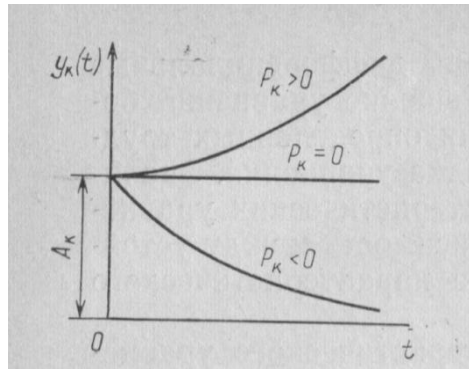


Рис. IV-11. График зависимости составляющей $y_k(t)$ переходного процесса во времени от знака вещественного корня характеристического уравнения.

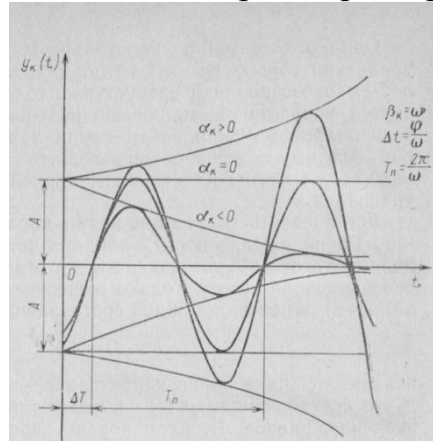


Рис. IV-12. График зависимости колебательной составляющей $y_k(t)$ переходного процесса во времени от знака вещественной составляющей сопряженных комплексных корней характеристического уравнения.

частью, то каждое слагаемое в выражении (IV,52) со временем будет уменьшаться до нуля, а следовательно, и все выражение $y(t)$ также со временем будет уменьшаться и стремиться к нулю. Таким образом, система будет устойчивой, если все вещественные корни ее характеристического уравнения отрицательны, а все комплексные имеют отрицательную вещественную часть.

Если характеристическое уравнение системы имеет положительные вещественные корни или сопряженные комплексные корни с положительной вещественной частью, то соответствующие им слагаемые $y_k(t)$ в выражении (IV,52) с течением времени увеличиваются и стремятся к бесконечности. А если хотя бы одно из слагаемых выражения (IV,52) со временем будет стремиться к бесконечности, то и все выражение $y(t)$ также будет возрастать до ∞ . Следовательно, система будет неустойчивой, если ее характеристическое уравнение имеет всего один положительный вещественный корень или хотя бы одну пару сопряженных комплексных корней с положительной вещественной частью.

Окончательно условие устойчивости систем может быть сформулировано следующим образом. Для устойчивости системы, описываемой линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, необходимо и достаточно, чтобы все вещественные корни ее характеристического уравнения были отрицательными, а комплексные корни имели отрицательную вещественную часть.

Если хотя бы один из вещественных корней характеристического уравнения системы положителен или одна пара сопряженных комплексных корней имеет положительную вещественную часть, то система неустойчива. Таким образом, исследование устойчивости линейной системы сводится к определению знаков вещественных частей корней характеристического уравнения.

Об устойчивости систем можно судить по расположению корней ее характеристического уравнения на комплексной плоскости; для устойчивой и неустойчивой систем оно показано на рис. IV-13. Для устойчивости линейной системы необходимым и достаточным условием является расположение всех корней характеристического уравнения на комплексной плоскости слева от мнимой оси, т. е. в левой полуплоскости. Если хотя бы один вещественный корень характеристического уравнения системы или одна пара сопряженных комплексных корней находится в правой полуплоскости, то система неустойчива. Наличие одного нулевого корня ($p_k = 0$) или одной сопряженной пары чисто мнимых корней ($\alpha_k = 0$) при условии, что все остальные корни расположены в левой полуплоскости, свидетельствует о том, что система находится на границе устойчивости. Причем в первом случае система находится на границе аperiodической устойчивости, а во втором — на границе колебательной устойчивости. Таким образом, мнимую ось комплексной плоскости корней характеристического уравнения системы можно рассматривать как границу устойчивости.

Обычно границу устойчивости при перемещении по ней в направлении от $-\infty$ до $+\infty$ покрывают одинарной штриховкой с левой стороны. В устойчивой системе все корни ее характеристического уравнения должны располагаться в заштрихованной части, которая представляет собой область устойчивости. При нахождении корней за ее пределами система неустойчива. Если все корни расположены в пределах заштрихованной области и

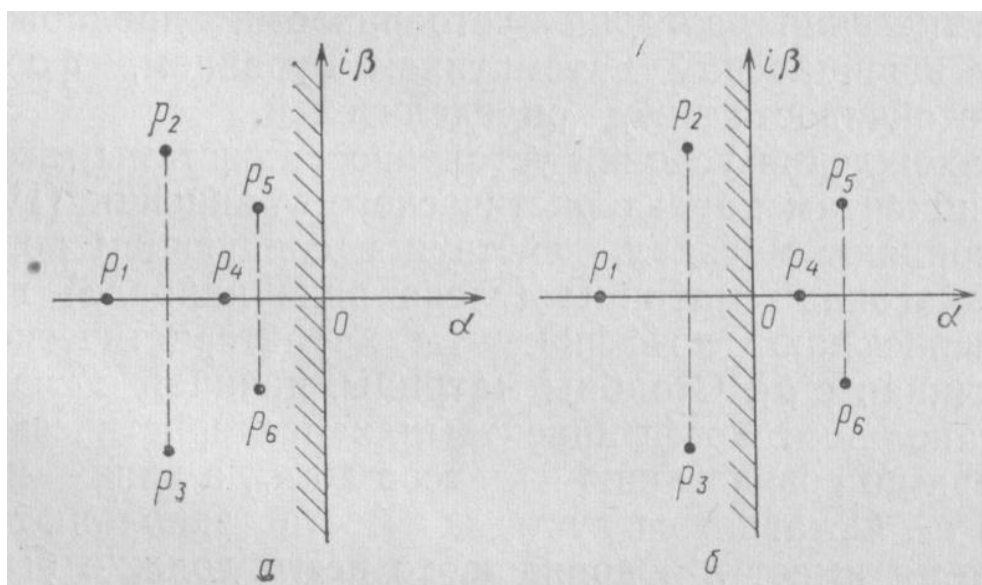


Рис. IV-13. Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости для устойчивой (а) и неустойчивой (б) систем 6-го порядка.

только один корень выходит на ее границу, то такая система находится на границе устойчивости.

Исследование устойчивости линеаризованных систем по знакам вещественных частей корней характеристического уравнения предполагает вычисление этих корней. Корни уравнения 1-й и 2-й степени находятся по простым формулам. Корни уравнений 3-й и 4-й степеней вычисляют по довольно сложным формулам. Корни же уравнений выше 4-й степени определяются приближенными методами вследствие громоздкости вычислений. Эти соображения потребовали разработки специальных правил, которые позволяют исследовать систему на устойчивость непосредственно по значениям коэффициентов характеристического уравнения, т. е. минуя вычисление корней.

Критерии устойчивости. С математической точки зрения критерии устойчивости представляют собой необходимые и достаточные условия, при соблюдении которых все корни характеристического уравнения системы имеют отрицательную вещественную часть.

АСР может быть устойчива, если в соответствующем ей полном характеристическом уравнении все постоянные коэффициенты имеют одинаковый знак, например, все положительны. Положительность всех коэффициентов полного характеристического уравнения является необходимым и достаточным условием устойчивости лишь для систем 1-го и 2-го порядков, что может быть подтверждено прямым нахождением корней соответствующих им характеристических уравнений. Для устойчивости систем 3-го и более высокого порядков наличие всех членов характеристического уравнения и положительность всех коэффициентов является необходимым, но не гарантирующим устойчивости системы условием. Для таких систем на коэффициенты характеристического уравнения должны быть наложены дополнительные ограничения, которые устанавливаются с помощью критериев устойчивости.

Алгебраический критерий устойчивости, предложенный в 1895 году швейцарским математиком Гурвицем, формулирует условие устойчивости в виде определителей.

Для нахождения условий устойчивости системы n -го порядка по коэффициентам характеристического уравнения (IV,53) сначала составляют матрицу, действуя в следующем порядке. По главной диагонали матрицы (слева вниз направо) последовательно выписывают коэффициенты характеристического уравнения, начиная с a_1 . Столбцы матрицы, начиная с главной диагонали, заполняют коэффициентами характеристического уравнения вверх по возрастанию индексов до a_n , а вниз — по их убыванию до a_0 . Оставшиеся пустыми места заполняют нулями. Если система имеет n -ый порядок, то всего должно быть заполнено n строк и n столбцов матрицы, приведенной ниже. Затем из матрицы выделяют диагональные определители или определители Гурвица; для этого в ней отчеркивают одинаковое

a_1	a_3	a_5	a_7	$\dots$	0	0
a_0	a_2	a_4	a_6	$\dots$	0	0
0	a_1	a_3	a_5	$\dots$	0	0
0	a_0	a_2	a_4	$\dots$	0	0
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	a_n	0
0	0	$\dots$	$\dots$	a_{n-3}	a_{n-1}	0
0	0	$\dots$	$\dots$	a_{n-4}	a_{n-2}	a_n

число строк и столбцов, начиная от левого верхнего угла матрицы. Определители Гурвица имеют вид:

$$\Delta_1 = a_1 \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} \quad \text{и т. д.}$$

Естественно, что определитель n -го порядка Δ_n включает в себя всю матрицу.

По алгебраическому критерию линейная система n -го порядка устойчива, если коэффициент a_0 и все n диагональных определителей Гурвица положительны.

Положительность определителя n -го порядка обычно не выявляют, так как он может быть представлен произведением

$$\Delta_n = a_n \cdot \Delta_{n-1}$$

и, следовательно, требование его положительности сводится к требованию одновременной положительности свободного члена характеристического уравнения a_n и предпоследнего определителя

$$\Delta_{n-1}$$

Ниже приведены условия устойчивости для систем 3-го, 4-го и 5-го порядков:

для $n = 3$

$$a_1 > 0 \quad a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \quad a_3 > 0$$

для $n = 4$

$$a_1 > 0 \quad a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \quad a_1 a_2 a_3 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4 > 0 \quad a_4 > 0$$

для $n = 5$

$$\begin{aligned} a_1 > 0 \quad a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \quad a_1 a_2 a_3 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4 + a_0 a_1 a_5 > 0 \\ a_1 a_2 a_3 a_4 - a_0 a_3^2 a_4 - a_1^2 a_4^2 + a_0 a_1 a_4 a_5 + a_0 a_2 a_3 a_5 - a_1 a_2^2 a_5 + a_0 a_1 a_4 a_5 \\ - a_0^2 a_5^2 > 0 \\ a_5 > 0 \end{aligned}$$

Алгебраический критерий обычно используют для исследования на устойчивость систем не выше 5-го порядка.

Пример IV-1. Исследуем на устойчивость АСР, приведенную на рис. IV-7, посредством алгебраического критерия, при следующих значениях параметров элементов системы: $T_0 = 420$ с, $T_{\text{и}} = 90$ с, $T_{\text{иу}} = 18$ с, $k_{\text{ип}} = 3,33$, $k_p = 0,4$, $k_{\text{иу}} = 1,5$.

По уравнению динамики системы (IV,24) напомним ее характеристическое уравнение

$$\begin{aligned} a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 &= 0 \\ a_0 &= \frac{T_0 T_{\text{иу}} T_{\text{и}}}{k_{\text{ип}} k_{\text{иу}}} \quad a_1 = \frac{(T_0 + T_{\text{иу}}) T_{\text{и}}}{k_{\text{ип}} k_{\text{иу}}} \\ a_2 &= \frac{1 + k_{\text{ип}} k_p k_{\text{иу}}}{k_{\text{ип}} k_{\text{иу}}} T_{\text{и}} \quad a_3 = 1 \end{aligned}$$

Подставляя значения параметров элементов системы, получим

$$136080 p^3 + 7884 p^2 + 54 p + 1 = 0$$

По алгебраическому критерию система 3-го порядка устойчива, если все коэффициенты характеристического уравнения положительны и произведение коэффициентов средних членов характеристического уравнения превышает произведение коэффициентов крайних членов.

В рассматриваемом случае все коэффициенты характеристического уравнения положительны, а также справедливо неравенство

$$7884 \cdot 54 > 136080 \cdot 1 \quad \text{т.е.} \quad 425736 > 136080$$

Таким образом, исследуемая АСР устойчива.

Пример IV-2. С помощью алгебраического критерия исследовать на устойчивость АСР из предыдущего примера, но при значении времени интегрирования $T_{\text{и}}$, равном 24 с.

Запишем характеристическое уравнение системы

$$36288 p^3 + 2102 p^2 + 14,4 p + 1 = 0$$

Следовательно, данная АСР неустойчива.

Амплитудно-фазовый, или частотный критерий устойчивости был предложен американским ученым Найквистом в 1932 году для исследования устойчивости усилителей с обратной связью; в теорию автоматического регулирования он был введен А. В. Михайловым в 1936 году. Амплитудно-фазовый критерий

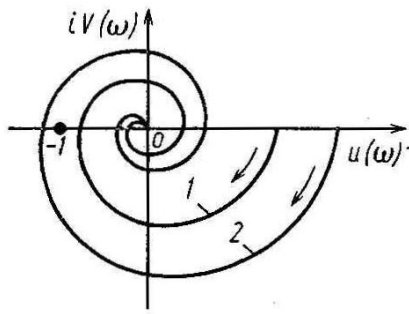


Рис. IV-14. Амплитудно-фазовые характеристики $W(i\omega)$ устойчивых разомкнутых систем, соответствующие устойчивой (1) и неустойчивой (2) системам в замкнутом состоянии.

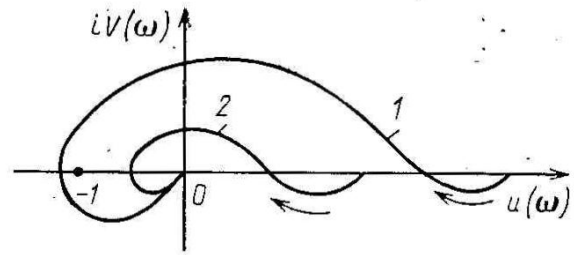


Рис. IV-15. Амплитудно-фазовые характеристики $W(i\omega)$ неустойчивых разомкнутых систем ($m = 2$), соответствующие устойчивой (1) и неустойчивой (2) системам в замкнутом состоянии.

устойчивости позволяет судить об устойчивости замкнутой системы по поведению соответствующей ей разомкнутой системы и по расположению АФХ последней на комплексной плоскости, что упрощает расчеты. Без доказательства приведем формулировку этого критерия устойчивости.

Если в разомкнутом состоянии система устойчива и ее АФХ $W(i\omega)$ при изменении ω от 0 до $+\infty$ не охватывает в отрицательном направлении точки с координатами $-1, i0$, то такая система в замкнутом состоянии также устойчива. Если АФХ $W(i\omega)$ разомкнутой системы при изменении ω от 0 до $+\infty$ охватывает в отрицательном направлении точку с координатами $-1, i0$, то соответствующая ей замкнутая система неустойчива (рис. IV-14).

Если в разомкнутом состоянии система неустойчива и имеет m корней справа от мнимой оси, то для устойчивости ее в замкнутом состоянии АФХ разомкнутой системы при изменении ω от 0 до $+\infty$ должна $m/2$ раз охватывать в положительном направлении точку с координатами $-1, i0$. В противном случае система в замкнутом состоянии также неустойчива (рис. IV-15).

В случае, когда характеристическое уравнение разомкнутой системы имеет один нулевой корень, при условии, что все остальные $n-1$ корни расположены слева от мнимой оси, АФХ разомкнутой системы нужно дополнить полуокружностью бесконечного радиуса, как показано на рис. IV-16. Если точка с координатами $-1, i0$ лежит за пределами получившейся замкнутой кривой, то в замкнутом состоянии система устойчива, если внутри кривой — то неустойчива.

Если во всех предыдущих случаях АФХ разомкнутой системы проходит на комплексной плоскости через точку с координатами $-1, i0$, то в замкнутом состоянии система находится на грани устойчивости.

Об устойчивости системы в замкнутом состоянии можно судить также по числу переходов АФХ разомкнутой системы отрицательной вещественной полуоси комплексной плоскости в интервале от $-\infty$ до -1 . Переход называют отрицательным,

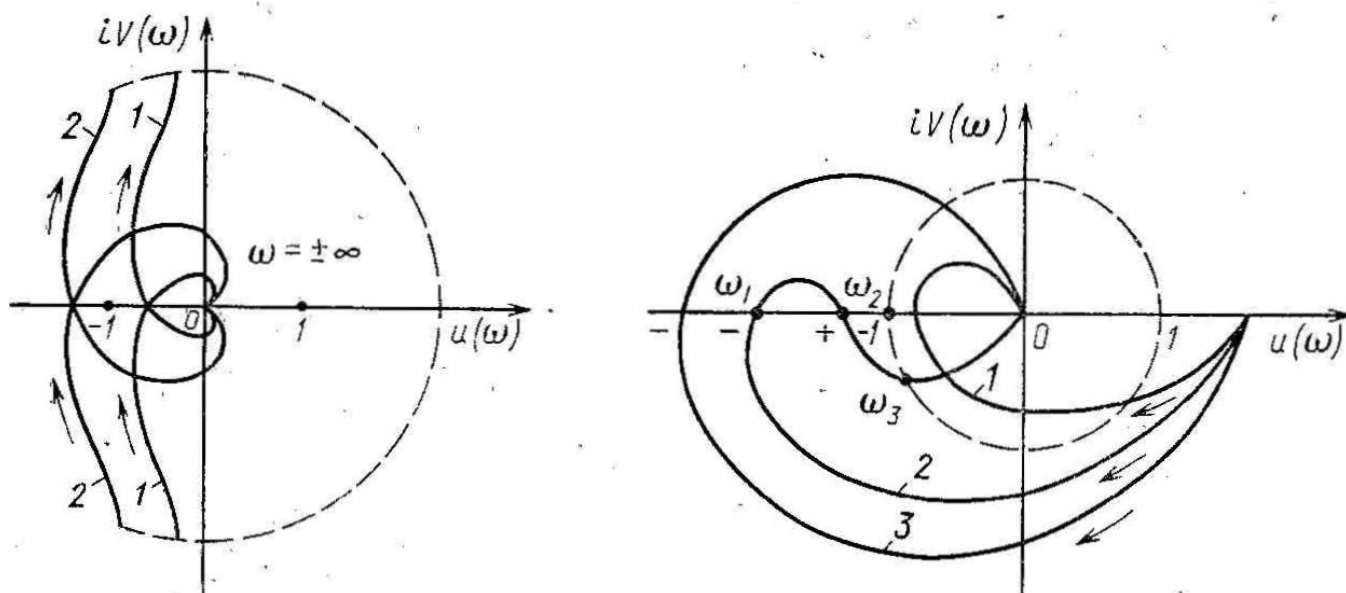


Рис. IV-16. Амплитудно-фазовые характеристики $W(i\omega)$ разомкнутых систем с одним нулевым корнем, соответствующие устойчивой (1) и неустойчивой (2) системам в замкнутом состоянии.

Рис. IV-17. Амплитудно-фазовые характеристики систем с разным числом переходов: 1 — без переходов; 2 — один положительный и один отрицательный переходы; 3 — один отрицательный переход.

если при возрастании α АФХ переходит из третьего квадранта во второй, и положительным при переходе из второго квадранта в третий.

На рис. IV-17 приведены три АФХ, имеющие различное число переходов: характеристика 1 не имеет переходов, 2 — один отрицательный и один положительный переходы, 3 — один отрицательный. Из предыдущего известно, что если в разомкнутом состоянии система устойчива, то в случае 1 и 2 АФХ соответствуют устойчивым системам, а в случае 3 — неустойчивой. Это позволяет дать вторую формулировку амплитудно-фазового критерия устойчивости.

Если в разомкнутом состоянии система устойчива и ее АФХ имеет одинаковое число положительных и отрицательных переходов, то в замкнутом состоянии она также устойчива. Если же число отрицательных переходов АФХ превышает число положительных, то в замкнутом состоянии система неустойчива.

Если в разомкнутом состоянии система неустойчива и имеет, m корней характеристического уравнения справа от мнимой оси, то для устойчивости этой системы в замкнутом состоянии необходимо, чтобы число положительных переходов АФХ превышало число отрицательных на $m/2$. Если же число положительных переходов АФХ не превышает числа отрицательных на $m/2$, то в замкнутом состоянии такая система неустойчива.

Амплитудно-фазовый критерий может быть применен для исследования устойчивости систем любого (даже очень высокого) порядка. Он незаменим в тех случаях, когда составить уравнения динамики отдельных звеньев системы затруднительно, но имеется возможность экспериментального получения их частотных характеристик.

На практике об устойчивости замкнутых систем обычно судят по числу переходов логарифмической фазо-частотной характеристики (ЛФЧХ) разомкнутой системы, что объясняется простотой построения логарифмических характеристик.

Логарифмический амплитудно-фазовый критерий устойчивости. На рис. IV-18 показаны логарифмические частотные характеристики $L(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ разомкнутой системы, АФХ которой приведена на рис. IV-17 (кривая 2). Очевидно, что точками пересечения отрицательной вещественной полуоси АФХ в интервале от $-\infty$ до $-\infty$ соответствуют точки, для которых $L(\omega)$ и $\varphi(\omega) = -\pi$ ($-\pi, -3\pi, -5\pi, \dots$). Условимся называть отрицательными переходами логарифмической фазовой характеристики ее точки при $L(\omega) > 0$, в которых она с возрастанием ω пересекает горизонтальные прямые с ординатами $-\pi, -3\pi, -5\pi$ и т. д. сверху вниз, а положительными переходами — точки, в которых она пересекает те же прямые снизу вверх.

Сформулируем частотный критерий устойчивости применительно к логарифмическим характеристикам системы в разомкнутом состоянии.

Если система в разомкнутом состоянии устойчива и число положительных и отрицательных переходов ЛФЧХ одинаково, то в замкнутом состоянии такая система устойчива. Если же число отрицательных переходов ЛФЧХ превышает число положительных, то система в замкнутом состоянии неустойчива.

Если в разомкнутом состоянии система неустойчива и m корней ее характеристического уравнения расположены в правой полуплоскости, то для устойчивости системы в замкнутом состоянии число положительных переходов ЛФЧХ должно превышать число отрицательных на $m/2$. Если же число положительных переходов превышает число отрицательных на величину меньшую, чем $m/2$, то система неустойчива и в замкнутом состоянии.

При исследовании систем на устойчивость по логарифмическим характеристикам необходимо учитывать погрешность аппроксимации последних.

Выделение областей устойчивости в пространстве параметров системы является задачей более общего характера (критерии устойчивости применяются для исследования конкретных систем исследования на устойчивость). На практике это позволяет выбрать оптимальные значения кон-

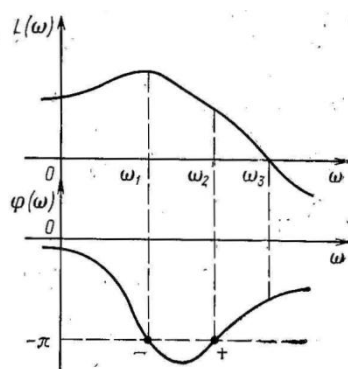


Рис. IV-18. Логарифмические частотные характеристики системы с положительным и отрицательными переходами.

структивных параметров отдельных элементов системы или определить диапазон возможного изменения настроечных параметров регулятора.

Такую задачу впервые поставил проф. Вышнеградский И. А., решивший ее для систем 3-го порядка с характеристическим уравнением

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$$

Для этого сначала путем деления исходного уравнения на коэффициент a_0 и введения новой переменной $\varphi = p/\sqrt[3]{a_3/a_0}$ было уменьшено число коэффициентов уравнения, что позволило получить уравнение

$$\frac{a_3}{a_0} \varphi^3 + \frac{a_1}{a_0} \sqrt[3]{\left(\frac{a_3}{a_0}\right)^2} \varphi^2 + \frac{a_2}{a_0} \sqrt[3]{\frac{a_3}{a_0}} \varphi + \frac{a_3}{a_0} = 0$$

Деление всех членов полученного на a_3/a_0 дало выражение

$$\varphi^3 + X\varphi^2 + Y\varphi + 1 = 0$$

Где

$$X = \frac{a_1/a_0}{\sqrt[3]{a_3/a_0}} \quad Y = \frac{a_2/a_0}{\sqrt[3]{(a_3/a_0)^2}}$$

Анализируя выведенное уравнение, Вышнеградский нашел, что система находится на границе устойчивости, если справедливо условие $XY=1$, а также, что система устойчива при $XY>1$ и неустойчива при $XY<1$.

В общем виде области устойчивости систем в плоскости ее параметров определяются методом D-разбиения, разработанным Ю. И. Неймарком. Если исследуется на устойчивость система при k переменных параметрах, то в n -мерном пространстве она может быть представлена параметрической точкой. Каждому положению этой точки соответствует определенное число корней характеристического уравнения в левой и правой полуплоскостях комплексной плоскости. Совокупность всех положений параметрической точки, имеющих одинаковое число корней в левой полуплоскости, представляет собой, так называемую, D-область. D-область системы n -го порядка при m корнях в правой полуплоскости обозначается $D(n-m, m)$. Разбиение пространства параметров на D-области называют D-разбиением, а границу между D-областями — границей D-разбиения. D-разбиение обычно проводят в плоскости одного или двух параметров системы. Рассмотрим выделение областей устойчивости в плоскости одного параметра.

При нахождении параметрической точки на границе D-разбиения один из корней характеристического уравнения распола-

гается на мнимой оси. Переход параметрической точки через границу D-разбиения соответствует переходу корня через мнимую ось. Перемещение параметрической точки по границе D-разбиения соответствует перемещению корня характеристического уравнения системы вдоль мнимой оси. Таким образом, граница D-разбиения представляет собой отображение мнимой оси в плоскости параметров системы.

Как и мнимую ось, границу D-разбиения штрихуют одинарной штриховкой с левой стороны при перемещении по ней в сторону возрастания значений w . Переход параметрической точки через границу D-разбиения с не заштрихованной стороны на заштрихованную соответствует переходу одного корня характеристического уравнения из правой полуплоскости в левую, и наоборот. Следовательно, D-области, разделенные границей D-разбиения, имеют разное число корней характеристического уравнения в левой полуплоскости. D-область, расположенная с заштрихованной стороны, будет иметь в левой полуплоскости на один корень больше, чем D-область, находящаяся с не заштрихованной стороны. Из всех полученных в плоскости параметра системы D-областей областью устойчивости будет та, при расположении параметрической точки в пределах которой все корни характеристического уравнения системы n -го порядка находятся в левой полуплоскости. Область устойчивости обозначается $D(n, 0)$.

Для нахождения значений параметра, при которых система устойчива, сначала строят границу D-разбиения на комплексной плоскости, и из полученных областей выделяют область, которая имеет наибольшее число корней в левой полуплоскости. Далее определяют с помощью любого критерия, является ли она областью $D(n, 0)$. Если является, то при любых вещественных значениях параметра в пределах области $D(n, 0)$ система устойчива, если нет, то ни при каких значениях параметра система неустойчива.

Область устойчивости в плоскости одного параметра выделяют в следующем порядке. В характеристическом уравнении исследуемой системы символ p заменяют на $i\omega$ и из полученного выражения находят параметр системы в виде комплексной величины. Затем выражают эту величину через действительную $U(\omega)$ и мнимую $iV(\omega)$ части или через модуль $A(\omega)$ и аргумент $\varphi(\omega)$, которые вычисляют для нескольких значений ω в интервале от 0 до $+\infty$ и заносят в таблицу. По вычисленным значениям строят кривую D-разбиения и заштриховывают ее. Выделяют на комплексной плоскости области с наибольшим числом корней характеристического уравнения в левой полуплоскости и дают заключение об устойчивости системы.

Пример IV-3. Выделить область устойчивости одноконтурной АСР, состоящей из устойчивого объекта 2-го порядка и ПИ-регулятора по коэффициенту передачи регулятора k_p , при следующих значениях параметров: $k_0 = 2$, $T_1 = 4$ мин, $T_2 = 10$ мин, $T_H = 5$ мин.

Таблица IV.8. Значения $U(w)$ и $V(w)$ для границы D-разбиения

ω	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	∞
$U(\omega)$	-0,5	-0,46	-0,42	-0,18	0,22	1,5	3,42	7,5	∞
$V(\omega)$	$+\infty$	+3,75	+1,5	0	-0,89	-2,1	-3,31	-4,8	$-\infty$

По передаточным функциям объекта (см. табл. II.1) и регулятора (см. табл. III.7) найдем передаточную функцию системы

$$W(p) = \frac{\frac{k_0}{T_1^2 + T_2 p + 1}}{1 + \frac{k_0}{T_1^2 + T_2 p + 1} \cdot \frac{k_p T_{\text{и}} p + 1}{T_{\text{и}} p}} = \frac{k_0 T_{\text{и}} p}{T_1^2 T_{\text{и}} p + T_2 T_{\text{и}} p + T_{\text{и}}(1 + k_0 k_p)p + k_0}$$

Из характеристического уравнения

$$T_1^2 T_{\text{и}} p + T_2 T_{\text{и}} p + T_{\text{и}}(1 + k_0 k_p)p + k_0 = 0$$

выделим величину k_p

$$k_p = -\frac{T_1^3 T_{\text{и}} p^3 + T_2 T_{\text{и}} p^2 + T_{\text{и}} p + k_0}{k_0 T_{\text{и}} p}$$

Заменив символ p на $i\omega$, получим комплексное выражение, которое разделим на вещественную $U(w)$ и мнимую $V(w)$ части

$$U(\omega) = \frac{1}{k_0} (T_1^2 \omega^2 - 1)$$

$$V(\omega) = -\frac{T_2 \omega}{k_0} + \frac{1}{T_{\text{и}} \omega}$$

Вычислим несколько значений $U(w)$ и $V(w)$ для w в интервале от 0 до $+\infty$. Полученные значения сведем в табл. IV.8.

По значениям $U(w)$ и $V(w)$ построим кривую границы устойчивости в плоскости параметра k_p , заштрихуем ее и выделим область с наибольшим числом корней характеристического уравнения $(m+1)$ в левой полуплоскости комплексной плоскости корней (рис. IV-19). В этой области k_p принимает значения от $-0,18$ до $+\infty$

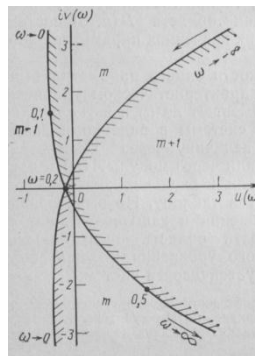


Рис. IV-19. Выделение области устойчивости в плоскости параметра k_p

Исследуем по алгебраическому критерию систему, претендующую на наименование устойчивой, при любом значении k_p , превышающем $-0,18$, на-

пример, при $k_p=1$. В этом случае характеристическое уравнение системы принимает вид

$$80p^3 + 50p^2 + 15p + 2 = 0$$

Все коэффициенты характеристического уравнения положительны, и произведение коэффициентов при средних членах больше, чем произведение коэффициентов при крайних членах

$$(50 \cdot 15) > (80 \cdot 2)$$

Таким образом при всех значениях $k_p > -0,18$ исследуемая система устойчива.

ГЛАВА V

ВЫБОР РЕГУЛЯТОРОВ И ДРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

1. Выбор регулируемых величин, управляющих воздействий и измерительных преобразователей

Качество получаемой в химической промышленности продукции зависит от ряда величин, определяющих нормальное протекание процесса. Поэтому при построении автоматических систем регулирования необходимо прежде всего определить величины, подлежащие контролю и регулированию, а также выявить точки введения управляющих воздействий и каналы их прохождения по объекту.

С этой целью составляют схему взаимных воздействий величин объекта, выделяют основные и дополнительные каналы прохождения сигналов, а затем составляют отдельные контуры регулирования, компенсирующие влияние возмущений. При необходимости основные контуры регулирования связывают между собой.

Контролируемые величины выбирают так, чтобы их число было минимальным, но чтобы при этом обеспечивалось наиболее полное представление о ходе протекания технологического процесса.

Управляющие воздействия вносят с помощью исполнительных устройств, которые изменяют материальные или тепловые потоки. При разработке АСР выбирают один или несколько показателей эффективности процесса, устанавливают необходимые ограничения, находят статические и динамические характеристики объекта регулирования. Анализ статических характеристик позволяет оценить степень влияния одних величин на другие и выявить те регулируемые величины, которые оказывают

максимальное воздействие на процесс. Если в объекте имеется несколько независимых величин, их регулируют отдельно, вводя соответствующие контуры регулирования. В объектах с зависимыми регулируемыми величинами используются контуры регулирования, в которых учитывается степень воздействия управляющих сигналов на регулируемые величины.

По динамическим характеристикам выбирают такие точки приложения управляющих воздействий, которые обеспечивают наибольшую скорость изменения регулируемых величин. Например, состав дистиллята на выходе из ректификационной колонны обычно регулируют по температуре жидкости на контрольной тарелке в укрепляющей части. На эту температуру можно влиять, изменяя расход либо флегмы, либо греющего пара. Однако на практике состав дистиллята регулируют изменением расхода флегмы, так как оно в большей степени влияет на температуру верха колонны.

При выборе измерительных преобразователей и измерительных устройств, в первую очередь, принимают во внимание такие факторы как пожаро- и взрывоопасность, агрессивность и токсичность среды, а также другие физико-химические свойства веществ. По условиям работы применяют измерительные устройства пневматического, электрического или гидравлического типа. Измерительные преобразователи выбирают, исходя из пределов изменения регулируемой или контролируемой величины объекта и в соответствии с нормальным рядом шкал выпускаемых приборов. При этом номинальное значение измеряемой величины или заданное значение регулируемой величины должно быть в пределах от 50 до 70% их максимального изменения.

По классу точности и чувствительности применяемые измерительные преобразователи и измерительные устройства должны соответствовать технологическим требованиям. В соответствии с требованиями к качеству регулирования учитывается инерционность преобразователей и измерительных устройств.

Для местного контроля используют наиболее простые и надежные приборы, так как они, как правило, находятся в неблагоприятных условиях (значительные колебания температуры и влажности, повышенная запыленность, вибрация и т. д.).

При дистанционном измерении технологических величин учитывается необходимость показаний, регистрации или интегрирования их текущих значений.

2. Выбор типа автоматического регулятора и определение параметров его настройки

Перед тем, как приступить к выбору автоматического регулятора составляют схему автоматического регулирования данного химико-технологического объекта и определяют канал регулирования. Последний выбирают так, чтобы изменение регулирующего воздействия x (поток вещества или энергии, подаваемый

в объект или выводимый из него) сопровождалось максимальным изменением регулируемой величины y , т. е. чтобы, коэффициент усиления объекта по каналу регулирования был максимальным.

Тип автоматического регулятора (закон регулирования) выбирается с учетом свойств объекта регулирования и заданных параметров качества переходного процесса. К качеству регулирования каждого конкретного технологического процесса, имеющего присущие только ему особенности, предъявляются конкретные требования; в одних случаях оптимальным или заданным может служить процесс, обеспечивающий минимальное значение динамической ошибки регулирования, в других — минимальное значение времени регулирования, и т. д. Поэтому в соответствии с требованиями технологии в качестве заданного выбирают один из трех типовых переходных процессов: граничный апериодический; с 20%-ным перерегулированием; с минимальной квадратичной площадью отклонения (см. гл. I).

Переходный процесс в АСР зависит от свойств химико-технологического объекта, от характера и величины возмущающих воздействий, а также от типа автоматического регулятора (его закона регулирования) и параметров настройки регулятора.

Динамические свойства конкретного объекта и поступающие на него возмущения характеризуются своими значениями или законами изменения. Активно влиять на них в процессе эксплуатации, как правило, не представляется возможным. В связи с этим для достижения требуемого качества регулирования при выбранном типовом переходном процессе следует принять подходящий закон регулирования и найти параметры настройки регулятора. Эту операцию выполняют после определения динамических свойств объекта.

Для аналитического определения свойств простых (с точки зрения их математического описания) химико-технологических объектов составляют уравнения динамики, и по коэффициентам полученных уравнений находят их свойства. Свойства простых объектов могут быть также найдены экспериментально по кривым изменения выходных величин объекта во времени при типовом возмущении.

Свойства сложных объектов, переходные процессы в которых описываются уравнениями высокого порядка, определяют в основном экспериментально. На практике эти объекты (канал прохождения сигнала $x \rightarrow y$) заменяют объектами 1-го порядка с запаздыванием; тогда уравнения динамики будут иметь вид:

при наличии самовывравнивания (устойчивые объекты)

$$T_0 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_0 x(t - \tau) \quad (\text{V, 1})$$

при отсутствии самовывравнивания (нейтральные объекты)

$$T_\varepsilon \frac{dy(t)}{dt} = x(t - \tau) \quad (\text{V, 2})$$

где y — регулируемая величина; x — регулирующее воздействие; T_0 — постоянная времени объекта; k_0 — его коэффициент передачи; T_ε — время разгона объекта; τ — время запаздывания; t — время.

Для выявления динамических свойств объектов необходимо: в первом случае найти числовые значения k_0 , T_0 и τ , а во втором — значения T_ε и τ . Указанные величины определяют по полученным экспериментально переходным характеристикам (см. рис. II-25). При этом ступенчатое возмущение наносят в допустимых по технологическим соображениям пределах.

Выбор типа регулятора (закон регулирования). Ориентировочно характер действия регулятора определяют по величине отношения времени запаздывания объекта к его постоянной времени τ/T_0 (для нейтральных объектов вместо T_0 подставляют значение T_ε):

Позиционный регулятор , $\tau/T_0 < 0,2$

Регулятор непрерывного действия . $0,2 < \tau/T_0 < 1,0$

Многоконтурная система регулирования $\tau/T_0 > 1,0$

В химической промышленности наиболее часто применяют регуляторы непрерывного действия (И-, П-, ПИ- и ПИД-регуляторы).

При выборе закона регулирования (тип регулятора) учитывают: свойства химико-технологического объекта; максимальную величину возмущения;

принятый для данного технологического процесса вид типового переходного процесса;

допустимые значения показателей качества процесса регулирования (динамическая ошибка $y_{l,доп}$; статическая ошибка $y_{ст,доп}$; время регулирования $t_{р,доп}$).

Задача выбора закона регулирования имеет множественное решение. Протекание в конкретном объекте заданного переходного процесса, имеющего требуемые значения заданных параметров качества может быть обеспечено регуляторами разных типов. Целесообразно использовать регуляторы наиболее простых типов. Выбор регулятора осуществляют в следующей последовательности.

Сначала проверяют — сможет ли простейший регулятор (И-регулятор) обеспечить заданное качество регулирования. Если да, то переходят к определению параметров его настройки. Если нет, то последовательно рассматривают регуляторы, имеющие более сложные законы. Выбор заканчивают, когда найден регулятор, обеспечивающий заданное качество регулирования. Затем находят значения параметров настройки этого регулятора.

Подбор регулятора начинают с определения максимального динамического отклонения регулируемой величины в замкнутом

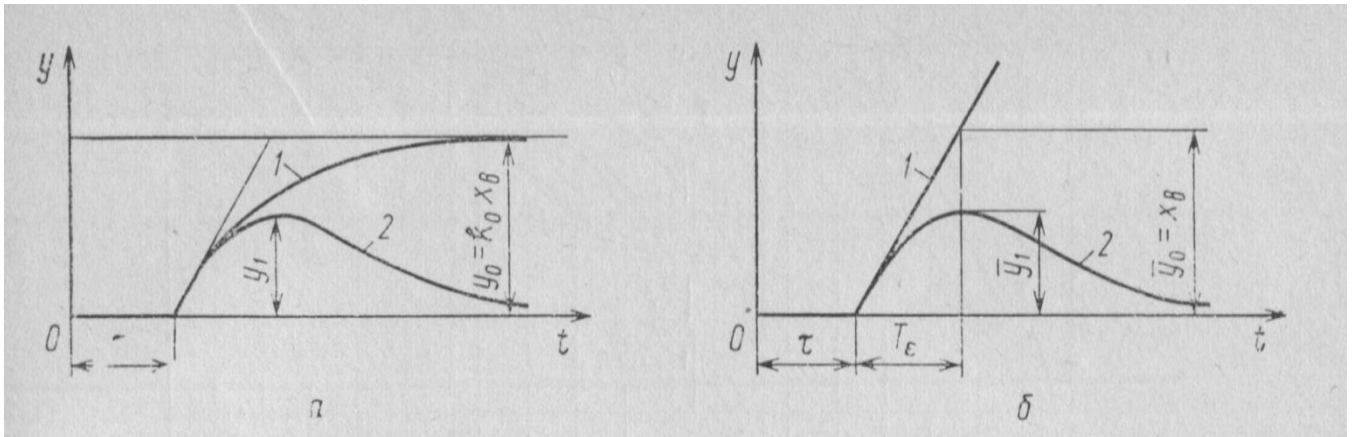


Рис. V-1. Динамические отклонения на устойчивых (а) и неустойчивых (б) объектах:

1 — для объекта; 2 — для замкнутой системы регулирования контуре. При этом должны соблюдаться условия

$$y_1 < y_{1,\text{доп}} \quad (\text{V}, 3)$$

Или

$$\bar{y}_1 < y_{1,\text{доп}} \quad (\text{V}, 3\text{а})$$

где $y_{1,\text{доп}}$ — максимально допустимое в системе регулирования динамическое отклонение выходной величины.

Для устойчивых объектов величина y_1 определяется по равенству:

$$y_1 = R_d k_0 x_B \quad (\text{V}, 4)$$

где $y_0 = k_0 x_B$ — максимальное (динамическое) отклонение регулируемой величины устойчивого объекта при нанесении на него возмущающего воздействия z_{max} или регулирующего воздействия x_B .

Характер динамических отклонений y_0 (для разомкнутого объекта) и y_1 (для замкнутой системы регулирования) показан на рис. V-1,а. Как следует из уравнения (V,4), с увеличением коэффициента R_d динамическое отклонение y_1 возрастает.

Для нейтральных объектов величина $\bar{y}_1$ определяется по равенству:

$$\bar{y}_1 = \bar{R}_d x_B \quad (\text{V}, 6)$$

где $\bar{R}_d$ — динамический коэффициент регулирования в системах с нейтральными объектами.

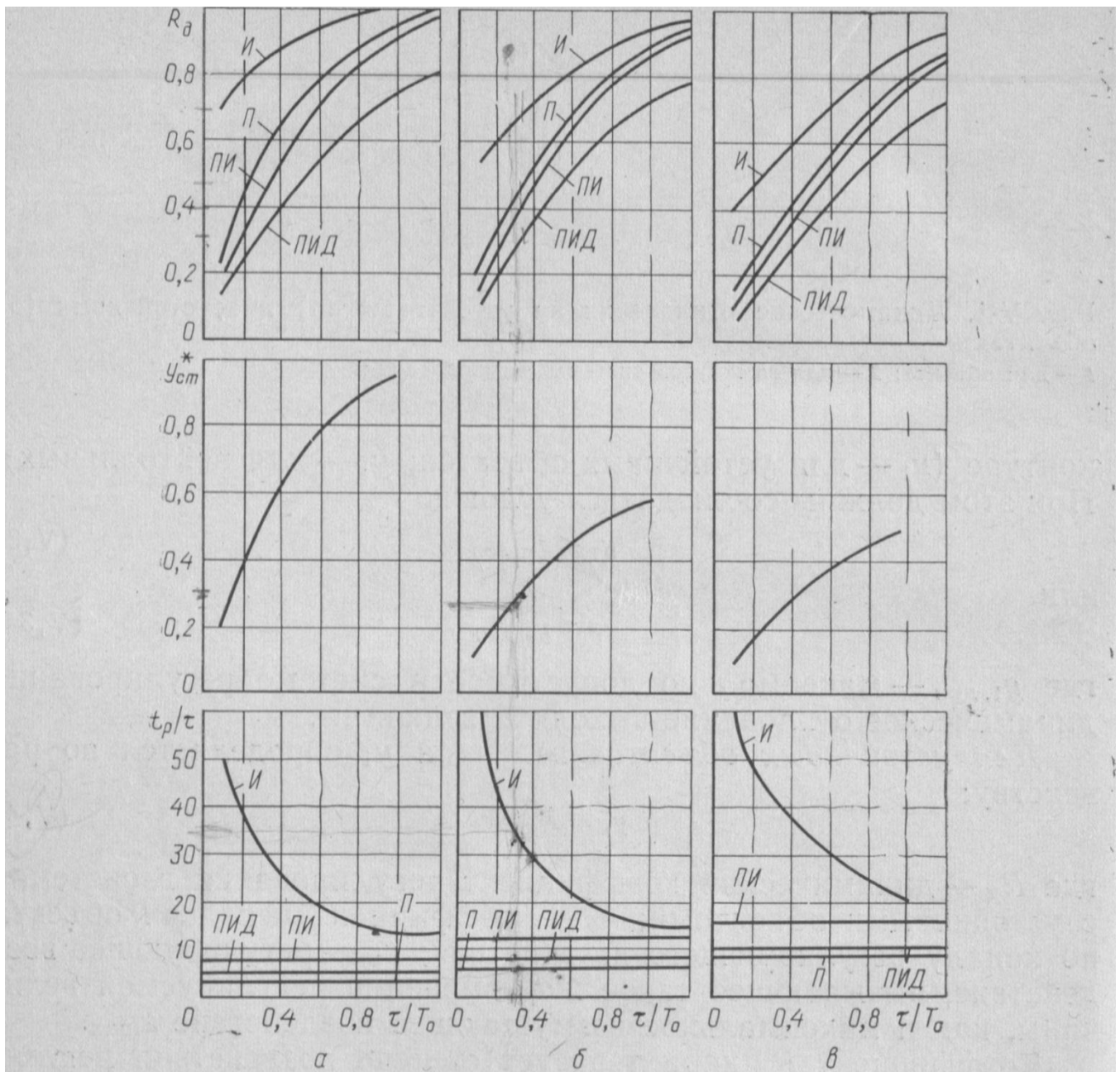


Рис. V-2. Динамические коэффициенты регулирования R_d , статические ошибки регулирования $y_{ст}^*$ и время регулирования t_p/τ устойчивых объектов: Переходный процесс: *а* — апериодический; *б* — с 20%-ным перерегулированием; *в* — с минимальной квадратичной площадью отклонения.

В данном случае коэффициент $\bar{R}_d$ определяют по уравнению:

$$\bar{R}_d = \bar{y}_1 / \bar{y}_0 \quad (V, 7)$$

где $\bar{y}_0 = x_\epsilon$ — динамическое отклонение регулируемой величины нейтрального объекта за время, равное T_ϵ при нанесении на объект регулирующего воздействия x_ϵ , эквивалентного максимально возможному возмущающему воздействию Z_{max} .

Физический смысл коэффициента $\bar{R}_d$ для нейтральных объектов иллюстрируется графиком, приведенным на рис. V-1,б. Величины коэффициентов R_d и $\bar{R}_d$ при которых в замкнутой системе обеспечивается протекание заданного типового переходного процесса, находят по графикам (рис. V-2 и V-3).

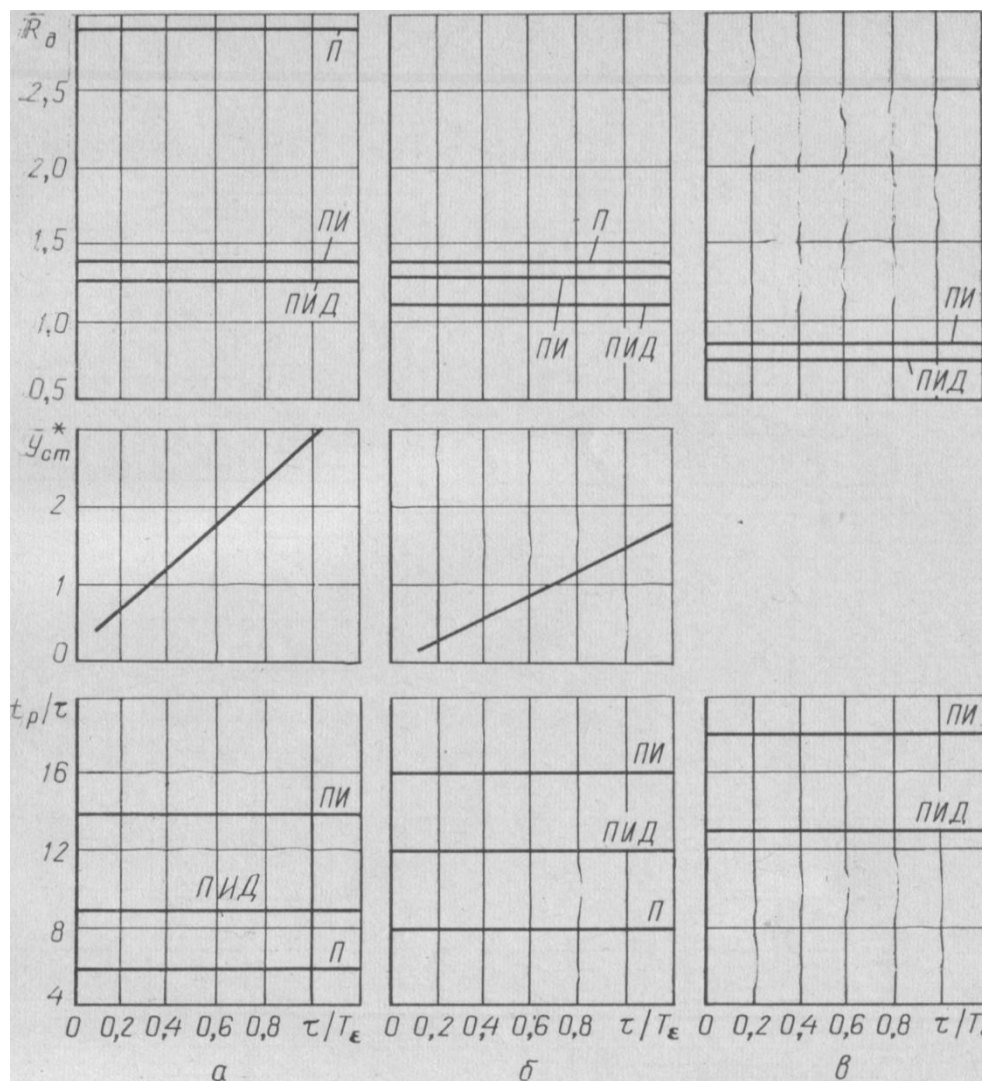


Рис. V-3. Динамические коэффициенты регулирования $\bar{R}_d$ статические ошибки регулирования $\bar{y}_{ст}^*$ и время регулирования t_p/τ нейтральных объектов: Переходный процесс: *а* — апериодический; *б* — с 20%-ным перерегулированием; *в* — с минимальной квадратичной площадью отклонения.

По значениям R_d или $\bar{R}_d$ определенным сначала для И-регулятора, по равенствам (V,4) или (V,6) вычисляют значения y_1 или $\bar{y}_0$ и сравнивают их с допустимыми по условию (V,3). При удовлетворении этого условия И-регулятор проверяют на время регулирования t_p . Если он не обеспечивает заданного динамического отклонения регулируемой величины в заданном контуре или необходимое время регулирования, то последовательно проверяют более сложные законы регулирования до удовлетворения условия (V,3) или (V,3а). Отметим, что для нейтральных объектов проверку начинают с П-регулятора.

В случае выбора П-регулятора дополнительно проверяют величину статической ошибки регулирования ($y_{ст}$ — для устойчивых объектов или $\bar{y}_{ст}$ — для нейтральных) на соблюдение неравенства:

$$y_{ст} < y_{ст,доп} \quad (V, 8)$$

Или

$$\bar{y}_{ст} < y_{ст,доп} \quad (V, 8a)$$

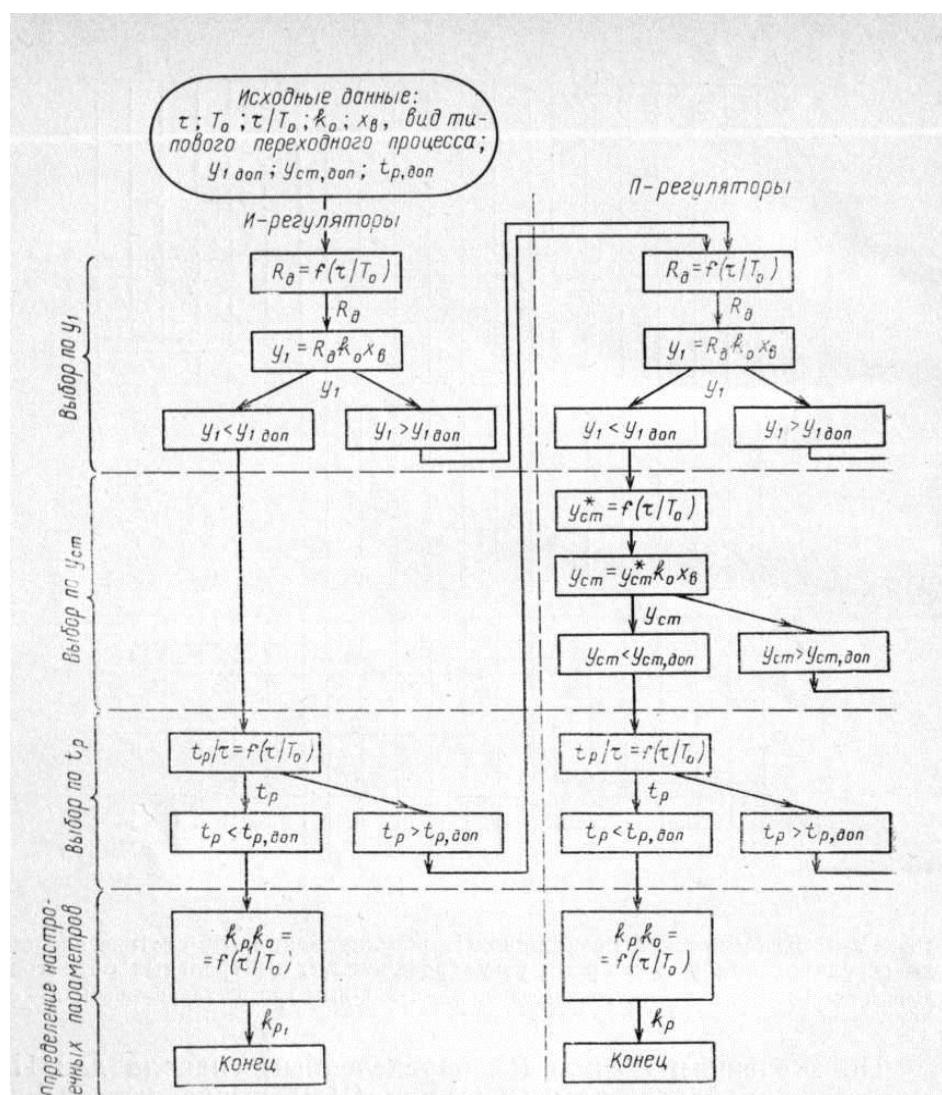


Рис. V-4. Схема последовательности выбора закона регулирования и определения оптимальных значений параметров настройки регулятора на устойчивых объектах.

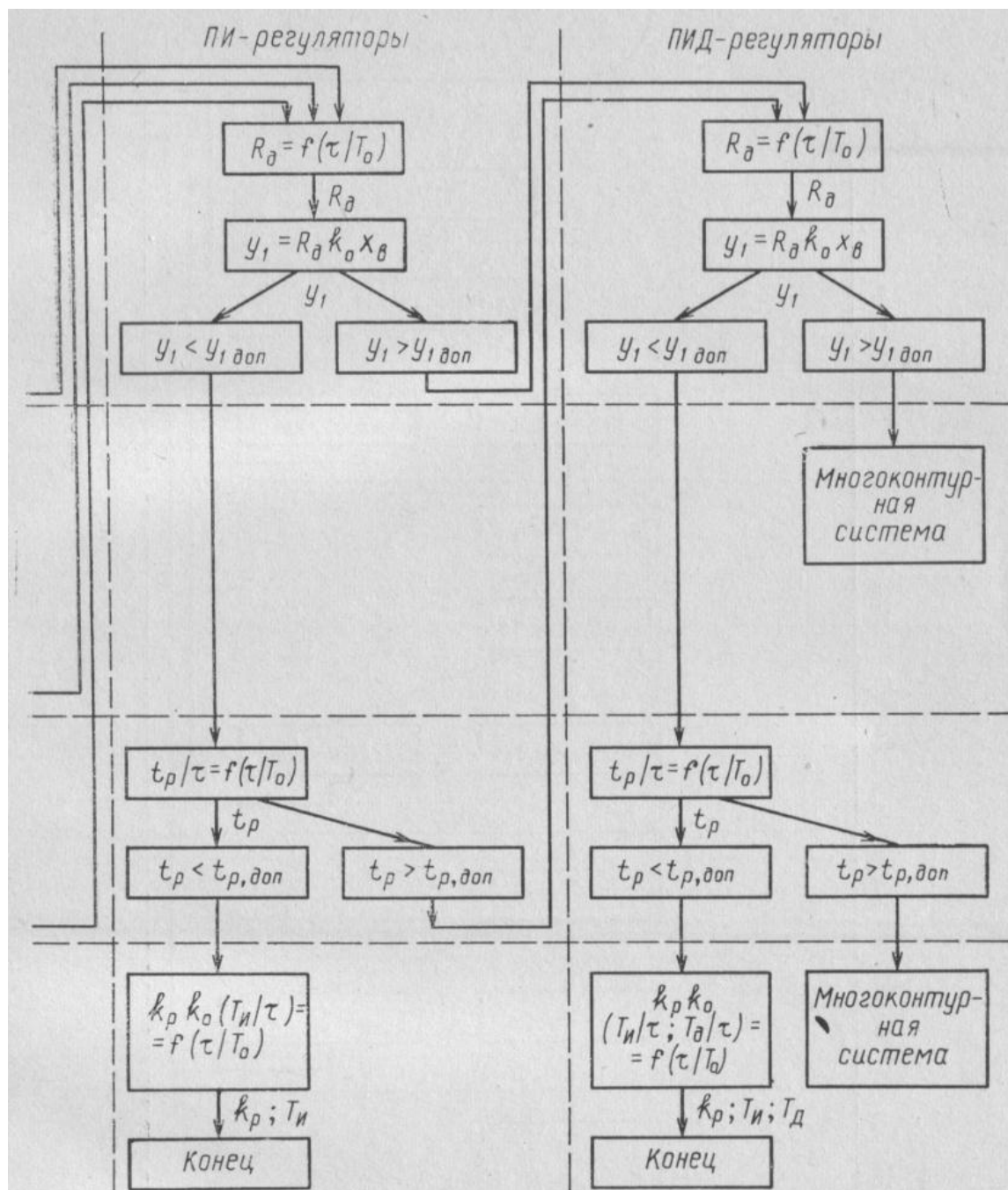
Статическую ошибку регулирования определяют по равенству:
 для устойчивых объектов

$$y_{\text{ст}} = y_{\text{ст}}^* k_0 x_B \quad (\text{V, 9})$$

для нейтральных объектов

$$\bar{y}_{\text{ст}} = \bar{y}_{\text{ст}}^* x_B \quad (\text{V, 10})$$

Здесь $y_{\text{ст}}^*$ и $\bar{y}_{\text{ст}}^*$ — относительные величины статической ошибки регулирования, равные соответственно $y_{\text{см}}$ или $\bar{y}_{\text{ст}}$ при $k_0=1$ и $x_B=1$. Значения $y_{\text{ст}}^*$ и $\bar{y}_{\text{ст}}^*$ находят по соответствующим графикам (см. рис. V-2 и V-3). Если полученное значение $y_{\text{ст}}^*$ или $\bar{y}_{\text{ст}}^*$ превышает допустимое, то переходят к регуляторам,



имеющим И - составляющую (ПИ- или ПИД-регуляторы).

Проверку регуляторов на время регулирования t_p выполняют в соответствии с условием

$$t_p < t_{p, \text{доп}} \quad (\text{V, 11})$$

где $t_{p, \text{доп}}$ — заданное максимально допустимое время регулирования

Значения t_p/τ , при которых в системе обеспечивается протекание заданного типового переходного процесса, находят по графикам (см. рис. V-2 и V-3).

Последовательность выбора закона регулятора при работе на устойчивых объектах приведена на рис. V-4, на нейтральных объектах — на рис. V-5.

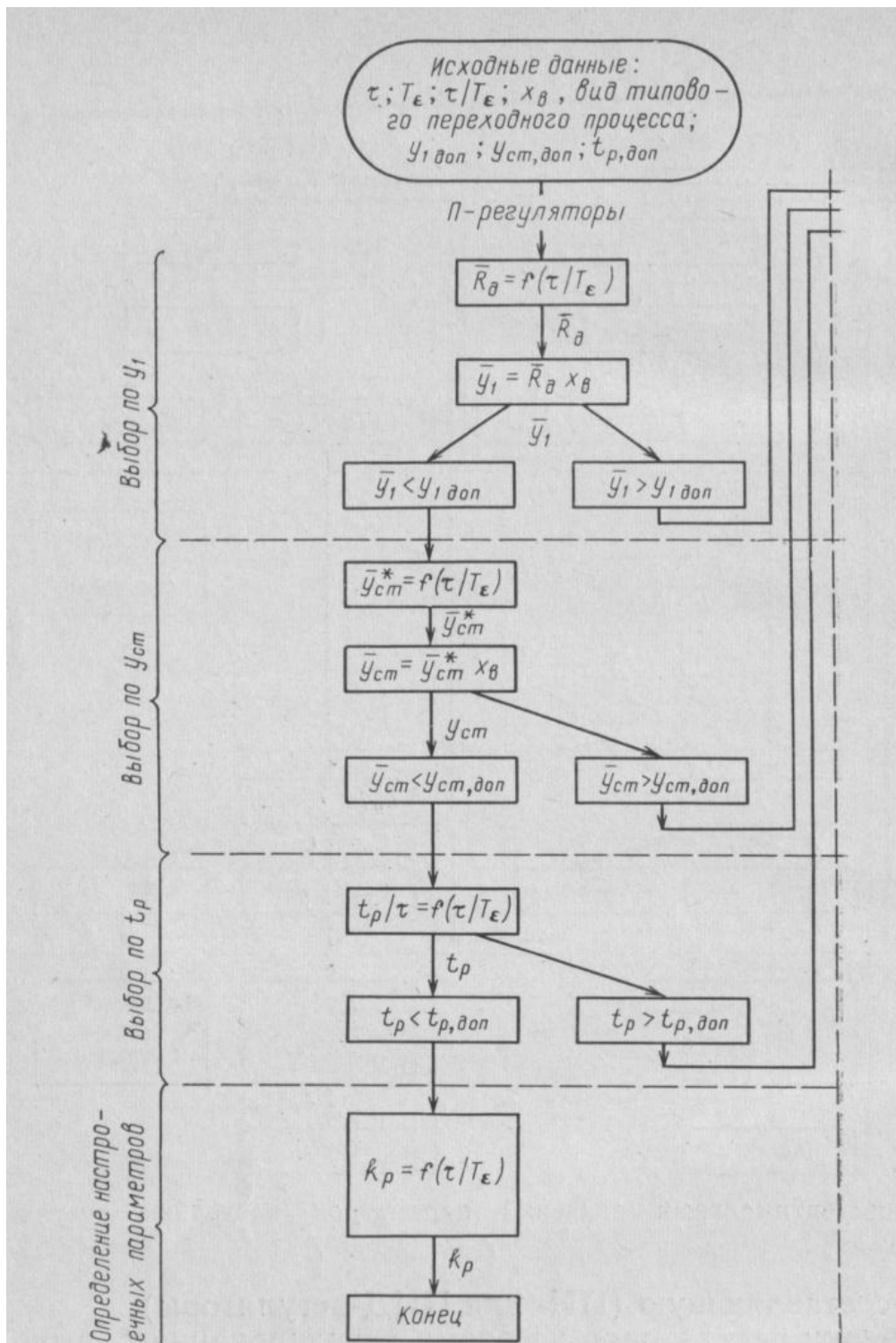
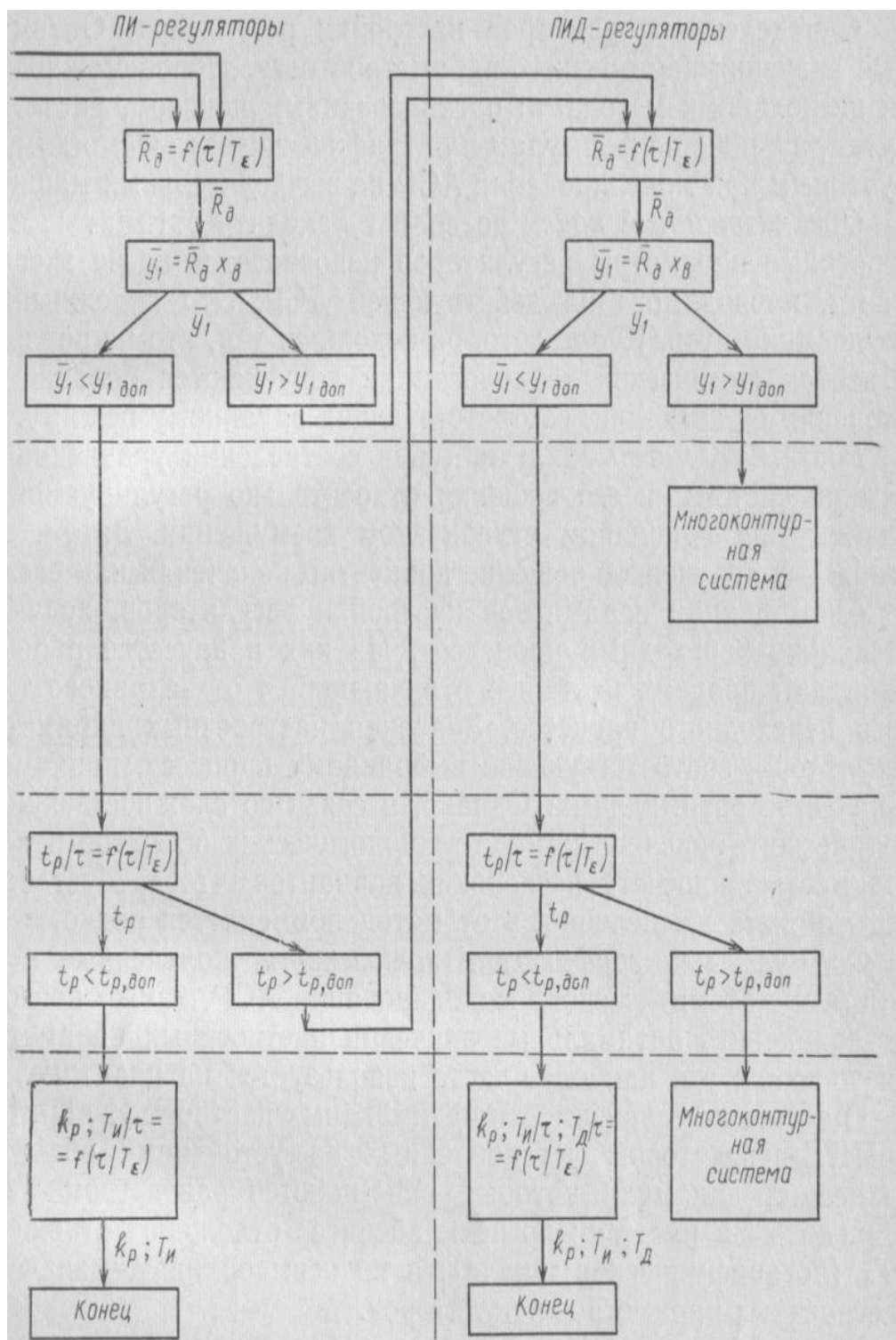


Рис. V-5. Схема последовательности выбора закона регулирования и определения оптимальных значений параметров настройки регулятора на нейтральных объектах.

Обычно И-регуляторы применяют на объектах, имеющих значительное самовыравнивание и малое время запаздывания. Для регулирования технологических величин на нейтральных объектах И-регуляторы не применяют, так как такие системы неустойчивы при любых значениях настроечных параметров. П-регуляторы обладают быстроедействием и работоспособны на инерционных объектах, но могут быть использованы лишь тогда, когда при изменении нагрузки объекта допустимо остаточное отклонение параметра от заданного значения. ПИ-регуляторы



имеют достаточное быстроедействие, кроме того, способны выводить параметр на заданное значение, поэтому их применяют чаще других. Если объекты характеризуются большим запаздыванием и претерпевают значительные изменения нагрузки, П- и ПИ-регуляторы могут не справиться с обеспечением требуемого качества регулирования; в таких случаях используют ПИД-регуляторы. Если ни один из рассмотренных законов регулирования не позволяет получить переходный процесс регулируемой величины, который не выходил бы за пределы заданных пока-

зателей качества, то для регулирования рассматриваемой величины вместо одно-контурной используют многоконтурную систему регулирования.

Определение параметров настройки регулятора. Оптимальные значения настроечных параметров регуляторов можно найти несколькими методами: организованным поиском, расчетным путем, а также по формулам или графическим зависимостям, полученным при моделировании АСР на вычислительных машинах.

Организованный поиск позволяет находить оптимальные настроечные параметры регуляторов непосредственно из эксперимента, проводимого на действующей АСР. Это надежный, но трудоемкий путь. Кроме того, он осложнен тем, что на реальных объектах химической технологии не допускаются большие отклонения от значений, соответствующих заданному режиму.

Расчетный метод заключается в составлении уравнения динамики системы и его решении относительно регулируемой величины при единичном ступенчатом возмущении. Затем, подставляя в полученное решение конкретные значения или различные комбинации параметров настройки регуляторов, получают несколько переходных процессов. Из них в качестве рабочего выбирают процесс, наименее отличающийся от заданного типового переходного процесса. Значения настроечных параметров регулятора, соответствующие выбранному процессу, принимают в качестве оптимальных. Однако, в связи со сложностью математического описания химико-технологических объектов и необходимостью просчета нескольких вариантов, что требует большого объема вычислений, этот метод применяется редко.

Формулы или графические зависимости, полученные в результате математического моделирования АСР, также позволяют определить оптимальные значения настроечных параметров регуляторов; это наиболее часто используется на практике.

Графические зависимости оптимальных настроек И-, П-, ПИ- и ПИД-регуляторов, установленных на устойчивых объектах, уравнения динамики которых описываются равенством (V,I), приведены на рис. V-6; по осям абсцисс отложено отношение τ/T_0 (логарифмическая шкала), а по осям ординат — значения настроечных параметров регуляторов.

По графикам для И-регулятора сначала находят произведение величин, отложенное по оси ординат, а по нему вычисляют значение величины k_{p1} — условного коэффициента передачи И-регулятора; k_{p1} характеризует скорость перемещения плунжера исполнительного устройства системы регулирования при постоянном значении отклонения текущего значения регулируемой величины от заданного. Для П-, ПИ- и ПИД-регуляторов по значению коэффициента передачи системы регулирования $k_c = k_0 k_p$ при известном значении k_0 находят коэффициент передачи регулятора k_p . Значения времени интегрирования T_i и времени дифференцирования T_d на графиках приведены по отношению к времени запаздывания объекта τ .

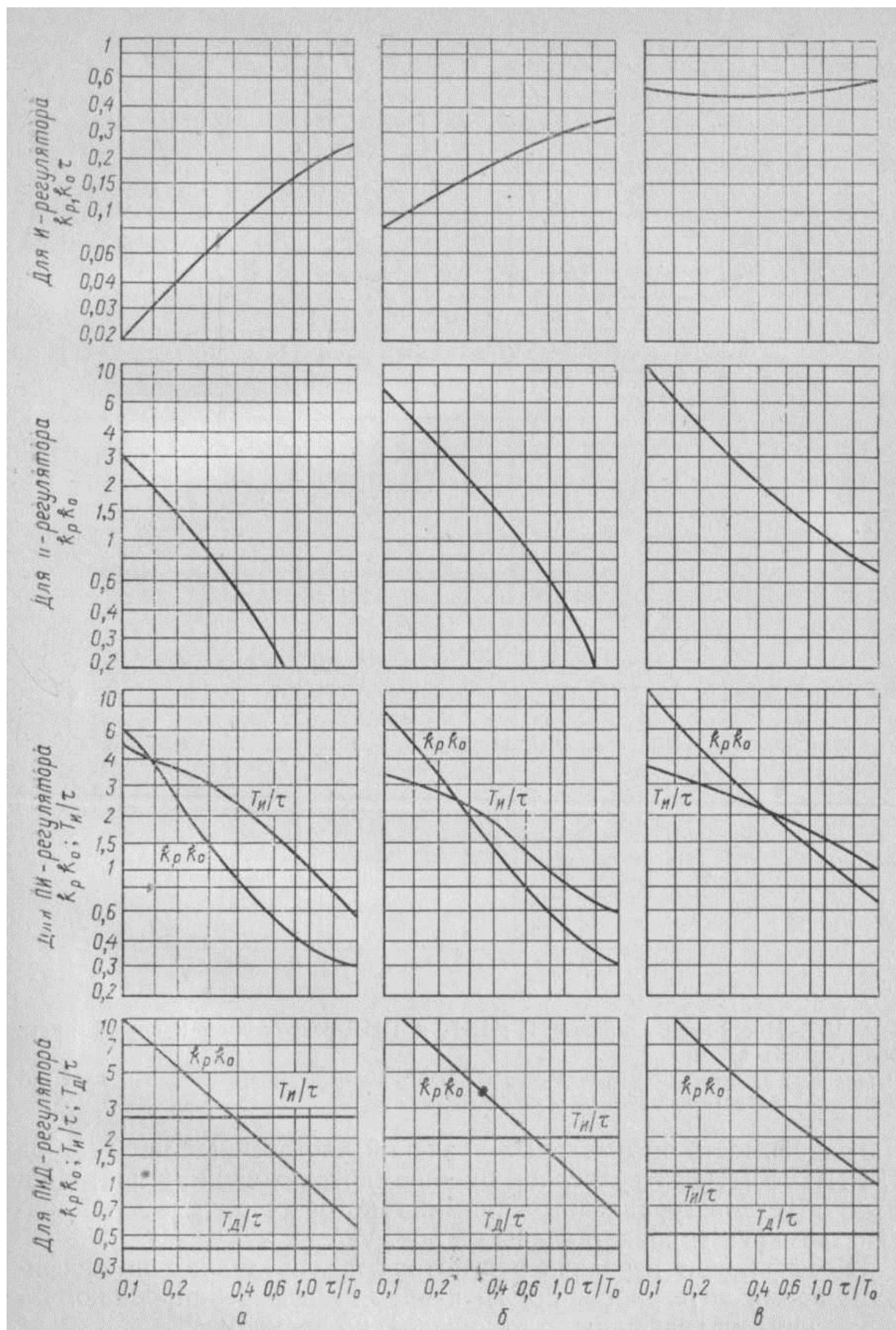


Рис. V-6. Настройные кривые И-, П-, ПИ-, и ПИД-регуляторов в случае устойчивого объекта:

Переходный процесс: а — аperiodический; б — с 20%-ным перерегулированием; в — с минимальной квадратичной площадью отклонения.

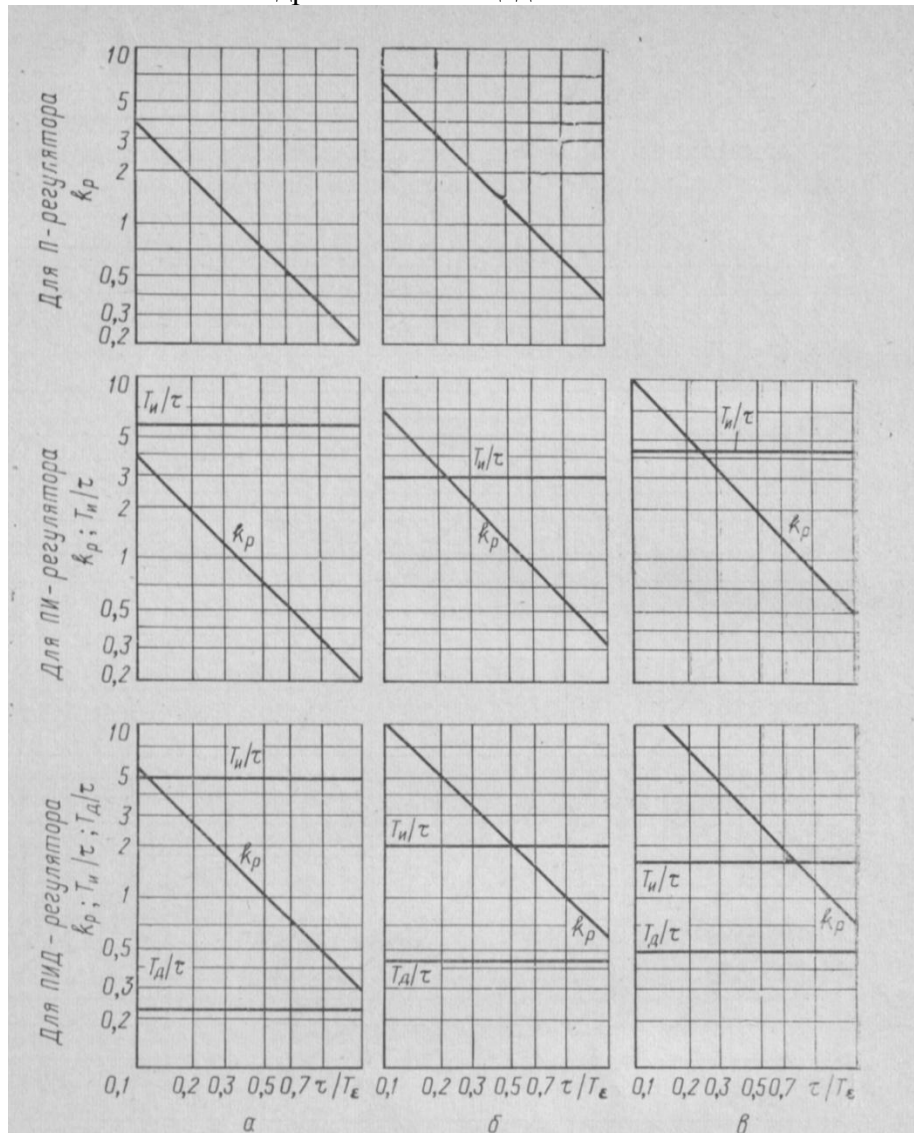


Рис. V-7. Настроечные кривые П-, PI- и PID-регуляторов в случае нейтральных объектов:

Переходный процесс: а — аperiodический; б — с 20%-ным перерегулированием; в — с минимальной квадратичной площадью отклонения.

Зависимость оптимальных значений настроечных параметров П-, PI- и PID-регуляторов от динамических свойств нейтральных объектов, уравнения динамики которых описываются равенством (V,2), представлены на рис. V-7.

Коэффициент передачи регулятора k_p определяют по графикам; время интегрирования T_i и время дифференцирования T_d приведены на графиках по отношению ко времени τ .

Пример V-1. Выбрать тип и определить оптимальные настроечные параметры регулятора, установленного на устойчивом объекте 1-го порядка с запаздыванием при следующих условиях:

параметры объекта: коэффициент передачи $k_0=1,2$; постоянная времени $T_0=204$ с; время запаздывания $\tau = 54$ с; отношение $\tau/T_0 = 0,27$;

система регулирования должна обеспечить переходный процесс с 20%-ным перерегулированием;

параметры качества переходного процесса не должны превышать следующих допустимых значений: динамическая ошибка регулирования $y_{1\text{ доп}} = 0,08$, статическая ошибка регулирования $y_{ст, доп} = 0,03$, время регулирования $t_{p, доп} = 600$ с;

регулирующее воздействие, соответствующее максимальному изменению возмущения, $x_b = 0,12$.

Найдем максимальное отклонение регулируемой величины

$$y_0 = k_0 x_b = 1.2 \cdot 0.12 = 0.144$$

По графикам (см. рис. V-2) определим динамический коэффициент передачи $\#A = \#I/\#O$ систем с регуляторами различных типов:

И-регулятор 0,64 ПИ-регулятор 0,32

П-регулятор 0,36 ПИД-регулятор 0,24

По формуле (V.4) найдем величины y_1 для этих систем:

И-регулятор 0,0922 ПИ-регулятор 0,0461

П-регулятор , , . . 0,0518 ПИД-регулятор . , . 0,034

Таким образом, в системе с И - регулятором $y_1 > y_{ст, доп}$ и И - регулятор не может быть применен.

Проверим систему с П - регулятором на величину $y_{ст}$. Для этого по графику (см. рис. V-2) найдем величину $y_{ст}^*$ для процесса с 20%-ным перерегулированием и вычислим $y_{ст}$ по формуле (V,9)

$$y_{ст} = y_{ст}^* y_0 = 0.28 \cdot 0.144 = 0.0403$$

Следовательно, в системе с П-регулятором $y_{ст} > y_{ст, доп}$ и заданное качество регулирования не будет обеспечено.

Проверим системы с ПИ- и ПИД-регуляторами на время регулирования t_p определяемое по графикам (см. рис. V-2). Для системы с ПИ-регулятором имеем $t_p = 12 \tau = 12 \cdot 54 = 648$ с; в случае ПИД-регулятора $t_p = 8\tau = 8 \cdot 54 = 432$ с. Таким образом, только для системы с ПИД-регулятором справедливо неравенство $t_p < t_{p, доп}$. Следовательно, для обеспечения заданных параметров качества регулирования необходимо выбрать ПИД - регулятор.

Оптимальные значения параметров настройки ПИД - регулятора определим по зависимостям, приведенным на рис. V-6:

$$k_p = \frac{k_p k_0}{k_0} = \frac{4.6}{1.2} = 3.8 \quad T_i = \frac{T_i}{\tau} \tau = 2.0 \cdot 54 = 108 \text{ с}$$

$$T_d = \frac{T_d}{\tau} \tau = 0.4 \cdot 54 = 21,6 \text{ с}$$

С помощью АВМ (электронных аналоговых вычислительных машин) также можно исследовать АСР и определять параметры настройки регуляторов.

АВМ очень эффективны как инструмент оценки качества процесса регулирования систем известной структуры при разных технологических режимах работы объекта и различных комбинациях параметров настройки регулятора.

Простота изменения значений параметров регулятора, а в, случае необходимости и отдельных параметров объекта, и возможность проведения эксперимента на моделях не в натуральном, а в машинном масштабе времени позволяет значи-

тельно сократить затраты времени на проведение каждого эксперимента и проверить большое число вариантов исследуемой задачи. Если исследуемая АСР не удовлетворяет требованиям технологического процесса по показателям качества регулирования, то обращаются к модели, поскольку на ней можно легко менять структуру АСР; после испытания нескольких вариантов выбирают наиболее подходящий из них.

Исходным материалом для моделирования АСР является математическое описание входящих в нее элементов или звеньев. Оно может быть получено либо путем составления их уравнений динамики, либо из переходных (временных) или частотных характеристик, полученных экспериментально.

При исследовании АСР применяют два метода составления схемы набора задач на АВМ. По первому методу решается нормальная система дифференциальных уравнений, непосредственно воспроизводимая в машинной схеме набора. По второму методу задачу набирают по структурной схеме исследуемой АСР, передаточные функции звеньев которой известны. Структурные схемы моделирования различных объектов приведены в табл. V.1, а схемы моделирования регуляторов непрерывного действия, отрабатывающих стационарные законы регулирования, — в табл. V.2.

При моделировании АСР запаздывание объектов вводится в схемы набора с помощью блоков постоянного или регулируемого запаздывания. Запаздывание воспроизводится также с помощью специальных схем. При этом реализуются приближенные передаточные функции звена запаздывания, которые можно получить, например, разложив экспоненциальную функцию в дробный ряд Паде и взяв два члена ряда

$$W(p) = e^{-p\tau} \approx \frac{\tau^2 p^2 - 6\tau p + 12}{\tau^2 p^2 + 6\tau p + 12} \quad (\text{V}, 12)$$

или приближенно описать формулой

$$W(p) = e^{-p\tau} \approx \frac{1 - (\tau p/2)}{1 + (\tau p/2)} \quad (\text{V}, 13)$$

Структурные схемы воспроизведения запаздывания по этим уравнениям после их преобразования приведены на рис. V-8. Для изменения времени запаздывания τ изменяют коэффициенты усиления решающих усилителей. Возможны и другие схемы.

На базе схем, приведенных в табл. V.1 и V.2, в качестве примера составлена электрическая модель системы, состоящей из устойчивого объекта 1-го порядка с запаздыванием и ПИ - регулятора (рис. V-9). С помощью такой модели могут быть получены графики переходных характеристик данной системы при различных значениях предела пропорциональности и времени интегрирования регулятора (рис. V-10). Эти кривые показывают, как влияют параметры настройки регулятора на качество регулирования.

При введении интегральной составляющей в закон регулирования (кривые б—г) статическая ошибка регулирования исчезает.

Таблица V.I. Структурные схема моделирование объектов

Объекты	Схемы для объекта без запаздывания	Схемы для объекта с запаздыванием
Нейтральный 1-го порядка		
Устойчивый 1-го порядка		
Нейтральный 2-го порядка		
Устойчивый 2-го порядка		

Таблица V. 2. Структурные схемы моделирования регуляторов

Закон регулирования	Схема регулятора
П	
И	
ПИ	
ПД	
ПИД	

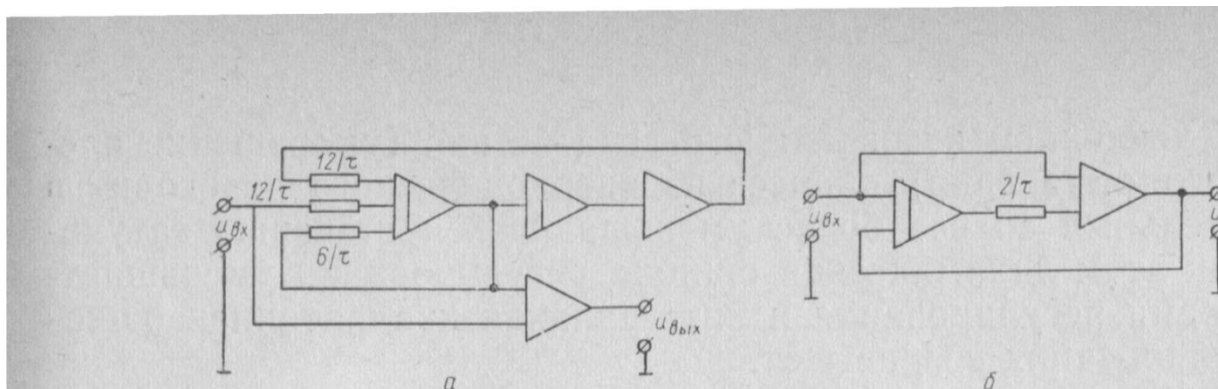


Рис. V-8. Структурные схемы воспроизведения запаздывания: *а* — по уравнению (V.12); *б* — то же (V.13).

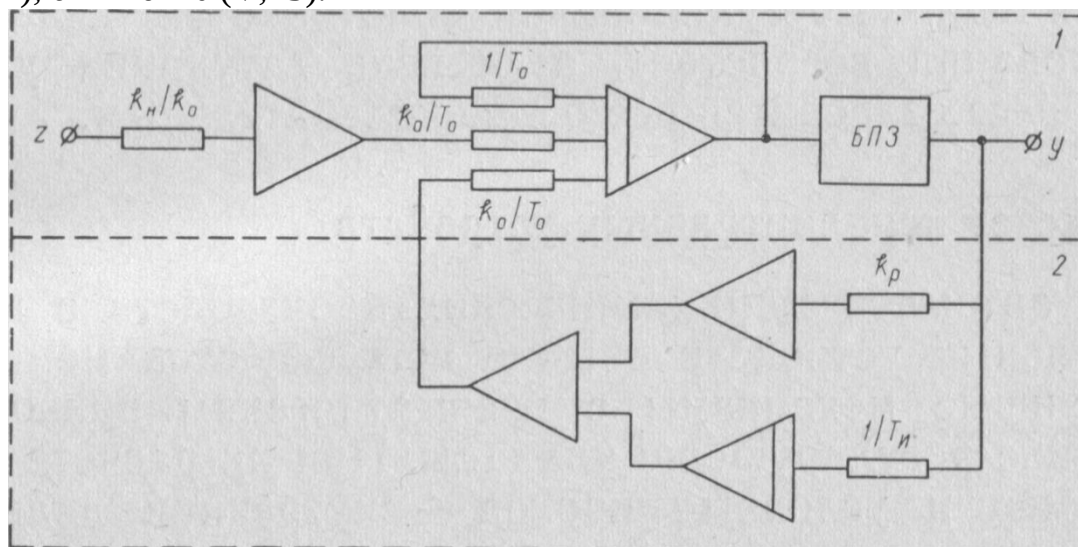


Рис. V-9. Структурная схема набора АСР, состоящей из устойчивого объекта 1-го порядка с запаздыванием (1) и ПИ-регулятора (2); БПЗ — блок постоянного запаздывания.

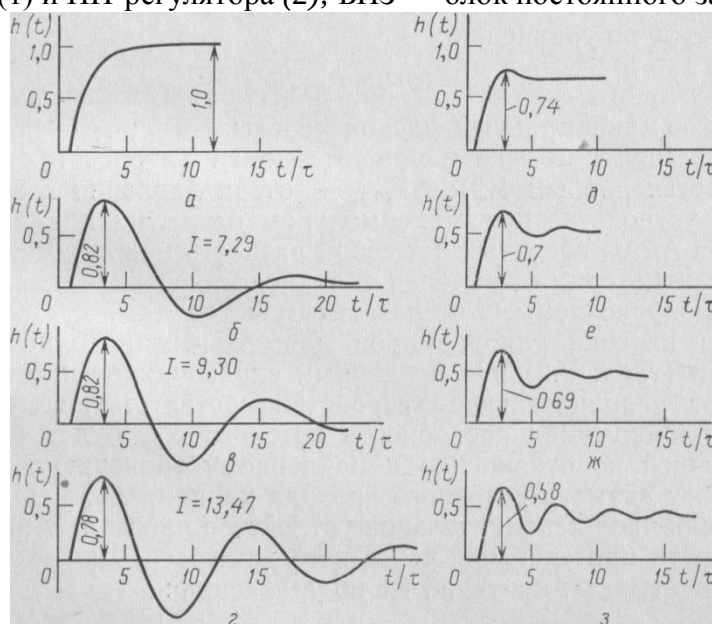


Рис. V-10. Влияние постепенного возрастания интегральной (б—г) и пропорциональной (д—ж) составляющих регулятора на переходную характеристику устойчивого объекта 1-го порядка с запаздыванием (а) при $k_0 = k_H = 1$ и $\tau/T_0 = 1$.

С усилением интегрального воздействия (уменьшение времени интегрирования) процесс из апериодического переходит в колебательный со все более уменьшающейся степенью затухания; при этом динамическая ошибка регулирования уменьшается, а время регулирования и интегральная квадратичная ошибка регулирования возрастают.

С усилением пропорционального воздействия (кривые δ —3) регулятора (увеличение коэффициента усиления регулятора или уменьшение предела пропорциональности) динамическая и статическая ошибки регулирования монотонно уменьшаются, время регулирования возрастает, а степень затухания уменьшается, т. е. процесс становится все более колебательным.

3. Расчет исполнительных устройств

При автоматизации химических производств в качестве исполнительных устройств обычно используются мембранные исполнительные механизмы с пневматическим приводом — пневматические регулирующие клапаны. При их расчете определяют типоразмер и условный проход — внутренний диаметр присоединительного патрубка. Затем клапан проверяется на влияние вязкости протекающей через него жидкости.

Расчет клапанов по жидкости выполняется в следующем порядке.

1. Определяют максимальную расчетную пропускную способность $K_{v \max}$ по уравнению:

$$K_{v \max} = 36 \cdot 10^3 \eta F_{\max} \sqrt{\rho / \Delta P_{\min}} \quad (\text{V, 14})$$

где $F_{\max}$ — максимальный расход среды, м³/с; ρ — плотность жидкости, кг/м³; η — коэффициент запаса (в расчетах обычно принимается равным 1,2); $\Delta P_{\min}$ — потери давления в исполнительном устройстве при максимальном открытии клапана, Па. Величина $\Delta P_{\min}$ представляет собой разность между имеющимся напором и потерями давления в технологических линиях и аппаратах, определяемыми по известным методикам.

2. Из перечня типоразмеров дроссельных исполнительных устройств (табл. V.3) или по данным справочников и каталогов выбирают исполнительное устройство соответствующего типа, условная пропускная способность которого K_{vy} будет ближайшей большей по отношению к найденному значению $K_{v \max}$, и определяют диаметр условного прохода клапана D_y .

3. Выбранное исполнительное устройство проверяют на влияние вязкости протекающей через него жидкости. Для этого сначала рассчитывают критерий Re по уравнению:

$$Re = 0.353 \frac{F_{\max}}{v D_y} \quad (\text{V, 15})$$

где $F_{\max}$ — максимальный расход среды, м³/ч; v — коэффициент кинематической вязкости, м²/с; D_y — условный проход регулирующего органа, мм.

Таблица V.3. Условные пропускные способности исполнительных устройств K_{vy} , м³/ч

Диаметр условного про- хода, Ду, мм	Значение K_{vy} исполнительных устройств		
	клапанных		заслоночных
	односедельных	двухседельных	
6	0,25		
10	1,5	—	—
15	0,16; 0,4; 1,0; 3,2	3,2; 4; 5; 6,3	—
20	1,6; 2,5; 4,0; 5,0	6,3; 8; 10	—
25	5; 6,3; 8; 10	6,3; 8; 10; 16	—
32	12	16; 25	—
40	20	25; 32; 40	—
50	32	25; 32; 40; 63	60
65	50	63; 100	100
80	80	63; 80; 100; 160	160
100	125	160; 250	250
125	200	250; 400	400
150	320	400; 630	600
200	500	630; 1000	1000
250	—	1000; 1600	1600
300	—	1600; 2500	2500
400	—	2500	4000
500	—	4000	6000

Если $Re \leq 2000$, то по графику (рис. V-II) и значению критерия Re определяют коэффициент учитывающий влияние вязкости жидкости (при $Re > 2000$, $\psi = 1$).

4. Определяют значение пропускной способности K_{vB} с учетом влияния вязкости жидкости, пользуясь формулой:

$$K_{vB} = \psi K_{vmax} \quad (V, 16)$$

Если найденное K_{vB} меньше или равно K_{vy} предварительно выбранного исполнительного устройства, то его выбор считают законченным. Если же $K_{vB} > K_{vy}$, то выбирают исполнительное устройство соответствующего типа, для которого $K'_{vy} > K_{vB}$ и по новому значению D'_y вновь проверяют его в соответствии с пп. 3 и 4, определяя Re' , ψ' , K'_{vB} . Если полученное значение $K'_{vB} \wedge K'_{vy}$, то выбор заканчивают, если же $K'_{vB} > K'_{vy}$, то делают следующее приближение.

Пример V-2. Рассчитать исполнительное устройство, установленное на трубопроводе, по которому в аппарат подается вода при температуре 90 °С (максимальный расход $F_{max} = 140$ м³/ч, или 0,039 м³/с); плотность воды $\rho = 1000$ кг/м³; кинематическая вязкость при 90°С $\nu = 0,328 \cdot 10^{-6}$ м²/с; перепад давлений на регулирующем органе при максимальном расчетном расходе $\Delta P_{min} = 16 \cdot 10^5$ Па.

По уравнению (V,14) определяем максимальную расчетную пропускную способность с учетом коэффициента запаса $\eta = 1,2$:

$$K_{vmax} = 36 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot 0,039 \cdot \sqrt{\frac{1000}{16 \cdot 10^5}} = 42,1$$

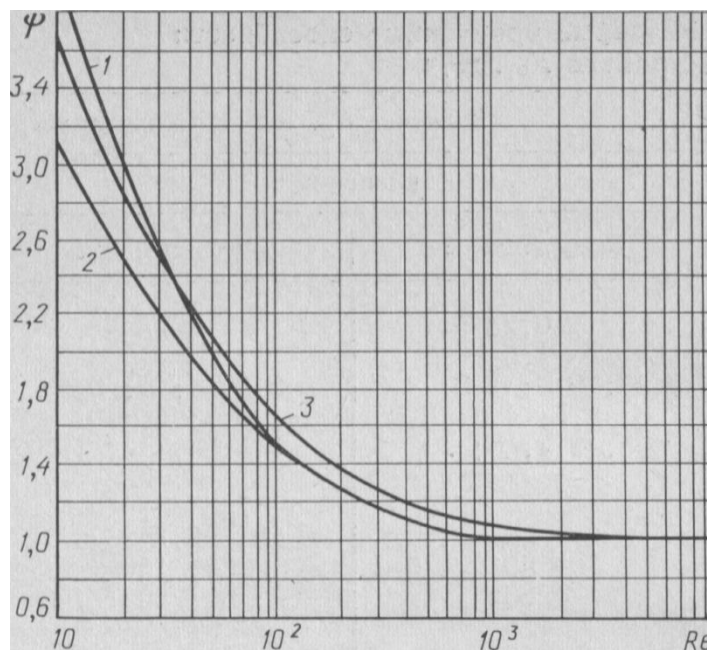


Рис. V-11. Зависимость коэффициента ψ от критерия Рейнольдса для двух-седельных (1), односедельных (2) и заслоночных (3) регулирующих органов.

По табл. V.3 предварительно выбираем клапанное двухседельное исполнительное устройство с условным проходом $D_y = 50$ мм и $K_{vy} = 63$ м³/ч. Определяем Re по формуле (V,15)

$$Re = \frac{0.353 \cdot 140}{0.328 \cdot 10^{-6} \cdot 50} = 3 \cdot 10^6$$

Так как полученное значение $Re > 2000$, влияние вязкости на расход жидкости не учитываем и принимаем выбранное исполнительное устройство.

Пример V-3. Рассчитать исполнительное устройство, установленное на линии подачи мазута в аппарат, если максимальный расход мазута $F_{\max} = 10$ м³/ч (0,0028 м³/с); температура до исполнительного устройства $t = 50$ °C; плотность $\rho = 990$ кг/м³; кинематическая вязкость при 50 °C $\nu = 5,9 \cdot 10^{-4}$ м²/с; перепад давлений на исполнительном устройстве при максимальном расходе $\Delta P_{\min} = 2,5 \cdot 10^5$ Па.

По формуле (V,14) находим максимальную расчетную пропускную способность с учетом коэффициента запаса $\eta = 1,2$:

$$K_{vmax} = 36 \cdot 10^3 \cdot 1.2 \cdot 0.0028 \cdot \sqrt{\frac{990}{2.5 \cdot 10^5}} = 7.6$$

По табл. V.3 предварительно выбираем односедельное клапанное исполнительное устройство, для которого $D_y = 25$ мм и $K_{vy} = 8$ м³/ч. По формуле (V.15) находим критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{0.353 \cdot 10}{5.9 \cdot 10^{-4} \cdot 25} = 240$$

и по кривой 2 (см. рис. V-11) находим коэффициент $\psi = 1,25$. Определяем пропускную способность клапана с учетом влияния вязкости жидкости:

$$K_{vB} = 1.25 \cdot 7.6 = 9.5 > K_{vy}$$

По полученной пропускной способности выбираем новое односедельное исполнительное устройство, для которого $D'_y = 32$ мм и $K'_{vy} = 12$ м³/ч.

Находим критерий Рейнольдса для вновь выбранного исполнительного устройства:

$$Re' = \frac{0.353 \cdot 10}{5.9 \cdot 10^{-4} \cdot 32} = 187$$

и по кривой 2 (см. рис. V-11) находим $\psi' = 1,3$.

Определяем новое значение K'_{vy}

$$K'_{vB} = 1.3 \cdot 7.6 = 9.9$$

Поскольку $K'_{vy} < K'_{vy}$, принимаем исполнительное устройство, для которого $D'_y = 32$ мм и $K'_{vy} = 12$ м³/ч

ГЛАВА VI

ОСОБЫЕ ВИДЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

При автоматизации процессов химической технологии помимо одномерных одноконтурных АСР, отрабатывающих непрерывные законы регулирования, используются также и другие системы. Они применяются с целью регулирования процессов более простыми средствами (двухпозиционные системы), обеспечения более высокого качества регулирования (каскадные и комбинированные системы) или для отыскания оптимального режима работы объекта (экстремальные системы).

1. Системы двухпозиционного регулирования

Системы двухпозиционного регулирования имеют в своем составе двухпозиционный или Пз-регулятор, выходная величина которого может принимать только два значения, соответствующих максимальной x_{max} и минимальной x_{min} величинам регулирующего воздействия. Такие системы относятся к нелинейным. В простейшем случае структурная схема системы двухпозиционного регулирования (рис. VI-1) может быть представлена в виде последовательного соединения Пз-регулятора (см. гл. III) и линейной части системы, охваченных отрицательной обратной связью.

Предположим, что при максимальном регулирующем воздействии x_{max} регулируемая величина объекта y возрастает. В этом случае для получения отрицательной обратной связи в замкнутом контуре регулирования регулятор должен иметь статическую характеристику, настроенную на «минимум» (рис. VI-2,а).

Для работоспособности системы двухпозиционного регулирования необходимо, чтобы при равенстве передаточных функций объекта $W_x(p)$ и $W_z(p)$ по каналам $x \rightarrow y$ и $z \rightarrow y$ текущие значения эквивалентного возмущения объекта $z_{эКВ}$ лежали

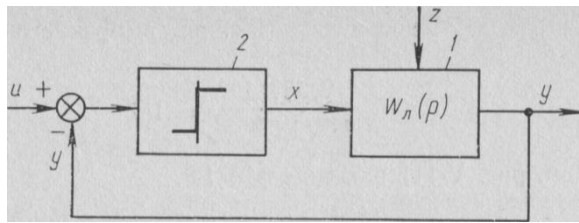


Рис. VI-1. Упрощенная структурная схема системы двухпозиционного регулирования:

1 — объект; 2 — двухпозиционный регулятор.

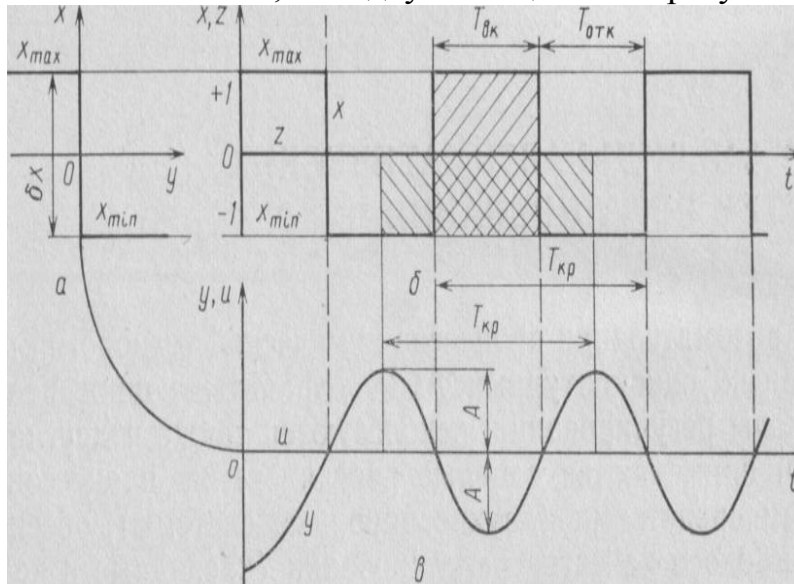


Рис. VI-2. Статическая характеристика двухпозиционного регулятора (а), изменение регулирующего воздействия x (б) и переходный процесс y (в) при возникновении в системе симметричных автоколебаний.

бы в пределах $x_{\max} > z > x_{\min}$. Последнее условие соответствует случаю, когда основным возмущением z является нагрузка объекта, изменение которой компенсируется регулирующим воздействием.

Пз-регулятор выработает регулирующее воздействие, равное $x_{\max}$, если текущее значение регулируемой величины y ниже ее заданного значения u (рис. VI-2,б); в этом случае регулируемая величина возрастает (рис. VI-2,в). При достижении текущим значением заданного регулирующее воздействие x мгновенно уменьшается до $x_{\min}$. Однако вследствие наличия у объекта инерционных свойств регулируемая величина еще продолжает возрастать в течение некоторого времени (правда, с уменьшающейся скоростью), и лишь затем начинает понижаться. При последующем пересечении регулируемой величиной заданного значения регулятор снова сформирует регулирующее воздействие $x_{\max}$, что через некоторое время вновь приведет к очередному повышению регулируемой величины и т. д. Таким образом, при использовании Пз-регуляторов регулируемая технологическая величина совершает колебания относительно заданного значения. Эти колебания относительно среднего значения с

амплитудой A и периодом $T_{кр}$ называют автоколебаниями (рис. VI-2, в). Период автоколебаний

$$T_{кр} = T_{вк} + T_{отк} \quad (\text{VI, 1})$$

где $T_{вк}$ и $T_{отк}$ — соответственно периоды включения и выключения сигнала (при x_{max} и x_{min}).

Моменты срабатывания Пз-регулятора определяются свойствами линейной части АСР и видом статической характеристики регулятора.

Для обеспечения квазиравновесного режима при двухпозиционном регулировании необходимо, чтобы количество вещества или энергии, уходящих из объекта в течение одного периода колебаний $T_{кр}$ (на рис. VI-2, б — площадь, заштрихованная слева направо вниз), было равно количеству вещества или энергии, поступающих в объект за тот же отрезок времени (площадь, заштрихованная слева направо вверх):

$$zT_{кр} = x_{max} T_{вк} + x_{min} T_{отк} \quad (\text{VI, 2})$$

Рассмотрим случай, когда относительная нагрузка Z имеет нулевое значение и равна полу сумме максимального x_{max} и минимального x_{min} значений регулирующего воздействия двухпозиционного Пз-регулятора, т. е.

$$z = \frac{x_{max} + x_{min}}{2} = 0 \quad (\text{VI, 3})$$

При этом отклонения x_{max} и x_{min} от значения $z=0$ одинаковы. Подставим значения $z=0$ и $x_{max} = -x_{min}$ из уравнения (VI.3) в (VI,2),

$$T_{вк} = T_{отк} \quad (\text{VI, 4})$$

В результате, в соответствии с равенством (VI, 1) период автоколебаний $T_{кр}$ вдвое превышает время $T_{вк}$, и кратность срабатывания регулятора n равна

$$n = \frac{T_{кр}}{T_{вк}} = \frac{T_{вк} + T_{отк}}{T_{вк}} = 2 \quad (\text{VI, 5})$$

При таком режиме работы в системе возникают симметричные автоколебания, положительная и отрицательная амплитуды которых равны между собой. При этом среднее значение регулируемой величины совпадает с заданным.

Если $x_{p, min} = 0$, то для возникновения в системе симметричных автоколебаний необходимо, чтобы пределы изменения выходной величины регуляторов

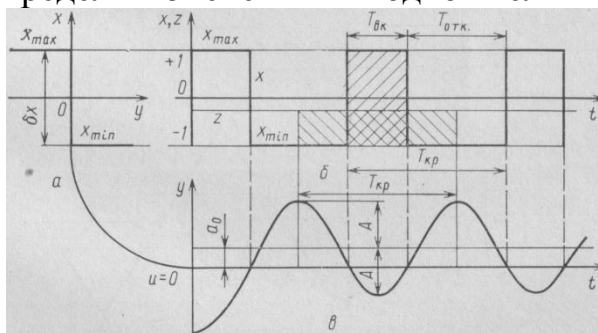


Рис. VI-3. Статическая характеристика двухпозиционного регулятора (а), изменение регулирующего воздействия x (б) и переходный процесс y (в) при возникновении в системе несимметричных автоколебаний.

$\Delta x_p = x_{p, \max} - x_{p, \min}$, т. е. величина $x_{p, \max}$ была равна удвоенному значению номинальной нагрузки объекта $z_{в,о}$, при котором регулируемая величина принимает заданное значение. При этом относительные величины должны иметь значения:

$$x_{\min} = -1 \quad x_{\max} = +1 \quad \delta x = x_{\max} - x_{\min} = 2 \quad (\text{IV, 6})$$

Если $T_{вк}$ не равно $T_{отк}$, то в системе возникают автоколебания регулируемой величины, форма которых несимметрична относительно заданного значения (рис. VI-3). При этом появляется квазистатическая ошибка регулирования a_0 , равная отклонению среднего значения автоколебаний от заданного значения регулируемой величины. Если $z < (x_{\max} + x_{\min})/2$, то $T_{вк} < T_{отк}$ и $a_0 > 0$ (именно этот случай представлен на рис. VI-3), и наоборот.

Качество двухпозиционного регулирования характеризуется параметрами, возникающих в системе автоколебаний: амплитудой A , частотой $\omega = 2\pi/T_{кр}$ и смещением a_0 среднего значения автоколебаний относительно заданного значения регулируемой величины. Эти параметры автоколебаний зависят от величины запаздывания и емкости химико-технологического объекта, значения его нагрузки, величины зоны нечувствительности регулятора δy и пределов изменения его выходной величины $\delta x = x_{\max} - x_{\min}$. Чем меньше амплитуда автоколебаний A и смещение a_0 тем качество регулирования выше; при этом $\omega_{кр}$ не должна быть очень большой. Начальные условия системы не влияют на параметры автоколебаний.

Влияние зоны нечувствительности на качество регулирования иллюстрируется графиками, приведенными на рис. VI-4. На рисунке показаны переходные процессы и текущее изменение регулирующего воздействия для нейтрального объекта 1-го порядка с запаздыванием и Пз-регулятора,

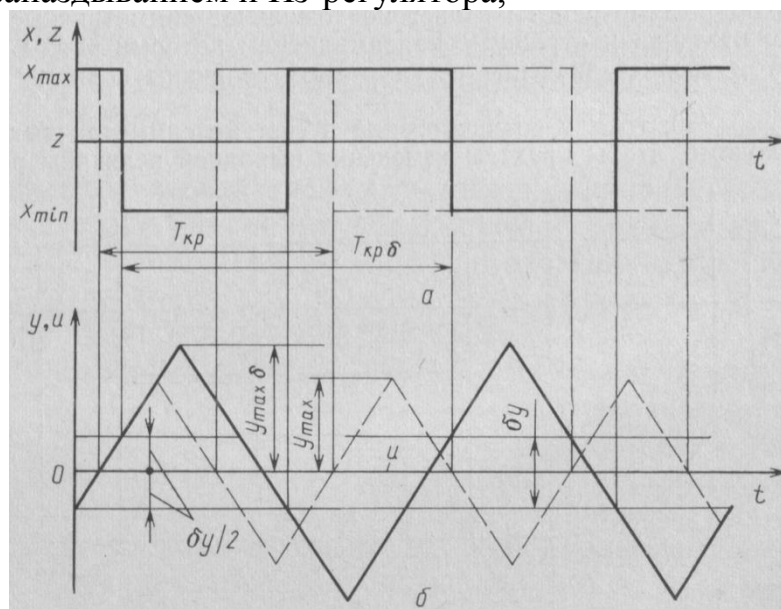


Рис. VI-4. Изменения регулирующего воздействия (а) и переходные процессы (б) в системах при наличии идеального двухпозиционного регулятора (пунктирные линии) и регулятора с зоной нечувствительности δy (сплошные линии)

статическая характеристика которого однозначна, т. е. не имеет зоны нечувствительности (пунктирные линии), и регулятора с зоной нечувствительности (сплошные линии). Найдем значения параметров этих переходных процессов.

В первом случае после достижения заданного значения и срабатывания регулятора регулируемая величина будет продолжать изменяться в том же направлении со скоростью

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\delta x}{2T_{\varepsilon}} \quad (\text{VI, 7})$$

в течение времени t , а затем начнет изменяться в противоположном направлении с такой же скоростью. При этом максимальная ошибка регулирования y_{max} будет равна

$$y_{max} = \frac{\delta x}{2} \cdot \frac{\tau}{T_{\varepsilon}} \quad (\text{VI, 8})$$

а период автоколебаний $T_{кр}$

$$T_{кр} = \frac{4y_{max}}{\frac{dy}{dt}} = 4\tau \quad (\text{IV, 9})$$

Таким образом, с увеличением зоны нечувствительности регулятора качество регулирования ухудшается. Уменьшение же этой зоны приводит к уменьшению амплитуды и периода автоколебаний в системе. Поэтому в тех случаях, когда к точности регулирования предъявляются повышенные технологические требования и частота срабатывания регулятора не ограничена, следует применять регуляторы с возможно меньшей зоной нечувствительности.

Скорость изменения регулируемой величины [см. уравнение (VI,7)] и амплитуды автоколебаний [см. уравнение (VI,8)] пропорциональны изменению регулирующего воздействия δx . С уменьшением δx амплитуда A уменьшается. Следовательно, для повышения качества регулирования пределы изменения регулирующего воздействия следует уменьшать. Однако при этом необходимо иметь в виду, что регулирующее воздействие x_{min}

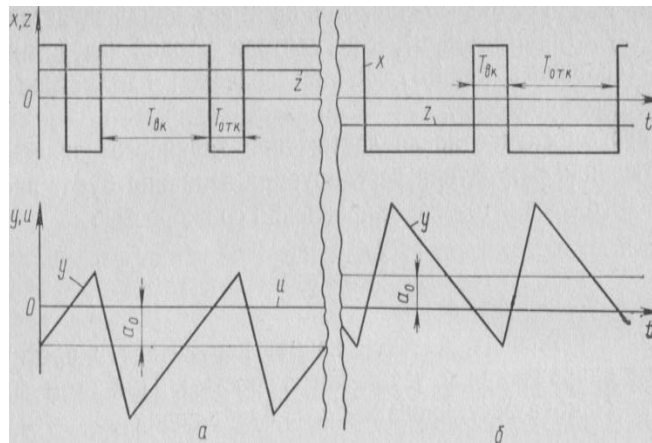


Рис. VI-5. Изменении регулирующего воздействия и переходные процессы в системах двухпозиционного регулирования при различных значениях нагрузки объекта: *a* — $z > 0$; *б* — $z < 0$.

должно быть меньше минимально возможной нагрузки объекта, а x_{max} — больше максимальной нагрузки. Поэтому при незначительных колебаниях нагрузки пределы изменения регулирующего воздействия могут быть установлены небольшими, что приведет к возникновению в системе автоколебаний малой амплитуды. При значительных колебаниях нагрузки диапазон δx должен быть установлен достаточно большим, а это приведет к появлению автоколебаний большой амплитуды. Таким образом, повышать качество регулирования путем уменьшения пределов регулирующего воздействия регулятора δx целесообразно только при небольших колебаниях нагрузки объекта.

Ранее мы в основном анализировали симметричные автоколебания регулируемой величины в системе, одним из необходимых условий возникновения которых является постоянство нагрузки объекта z (относительное ее изменение равно нулю). На практике же нагрузка объекта часто изменяется и относительная величина ее отличается от нуля. Это оказывает влияние на вид переходного процесса. Графики переходного процесса и изменения регулирующего воздействия в системе, состоящей из нейтрального объекта 1-го порядка с запаздыванием и Пз-регулятора без зоны нечувствительности, при возрастании абсолютного значения нагрузки в 1,5 раза и уменьшении ее в 2 раза относительно номинального значения приведены на рис. VI-5, *a*, *б*. В обоих рассматриваемых случаях автоколебания регулируемой величины асимметричны относительно ее заданного значения и отличны по характеру. Среднее значение автоколебаний смещается по отношению к заданному на величину a_0 в направлении, обратном изменению нагрузки. Эта квазистатическая ошибка регулирования может быть определена из равенства:

$$\frac{a_0}{A} = -z \quad (\text{VI, 12})$$

Влияние изменения нагрузки объекта на отношение $T_{вк}/T_{отк}$ кратность срабатывания регулятора n и относительный период автоколебаний $E_{кр}/\tau$ показаны на рис. VI-6. При превышении относительной нагрузкой z нулевого значения $T_{вк}$ увеличивается по сравнению с $T_{отк}$, а кратность срабатывания регулятора n уменьшается, и наоборот. Отклонение относительной нагрузки z от нулевого значения в обе стороны приводит к возрастанию периода автоколебаний.

Изменение заданного значения регулируемой величины от нуля при регулировании объекта, нагрузка которого продолжает оставаться на прежнем (нулевом) значении, приводит к появлению в системе несимметричных автоколебаний типа «треугольная волна» с одинаковым наклоном восходящих и нисходящих прямых. Среднее значение этих колебаний располагается между нулевым и вновь установленным заданным значением регулируемой величины.

Из рассмотрения влияния различных факторов на качество двухпозиционного регулирования следует, что для повышения качества регулирования необходимо уменьшать зону нечувствительности регулятора и, если это возможно, уменьшать пределы изменения регулирующего воздействия регулятора.

На химических производствах применяются пневматические Пз-регуляторы, а также электрические регуляторы, встроенные в потенциометры и другие приборы. Пз-регуляторы просты по конструкции, надежны в работе, несложны в настройке и обслуживании. Поэтому во всех случаях, когда Пз-регуляторы могут обеспечить требуемое качество регулирования, следует применять именно их. Пз-регуляторы в основном целесообразно использовать на объектах, обладающих малым запаздыванием и большой емкостью.

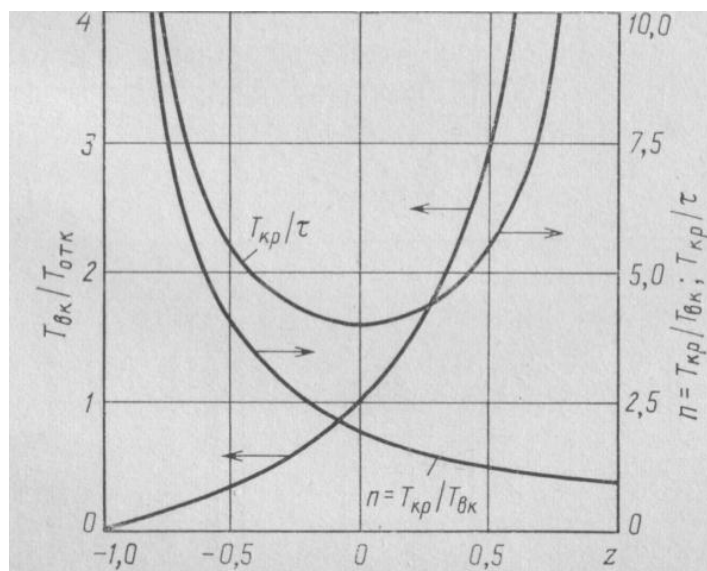
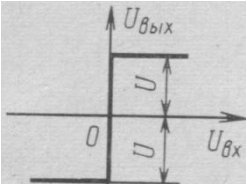
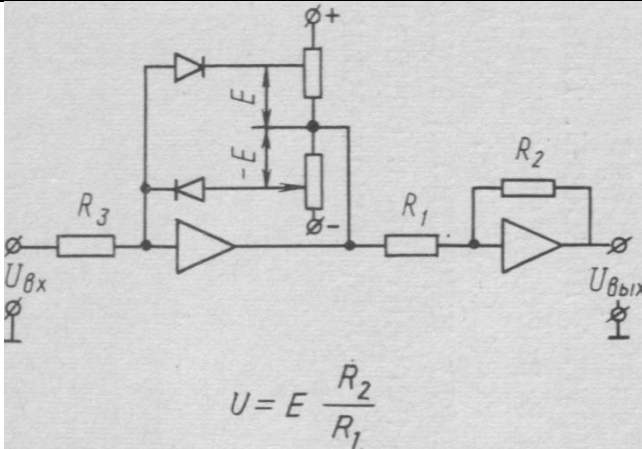
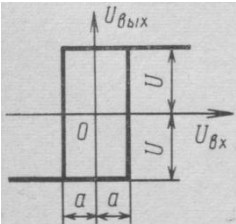
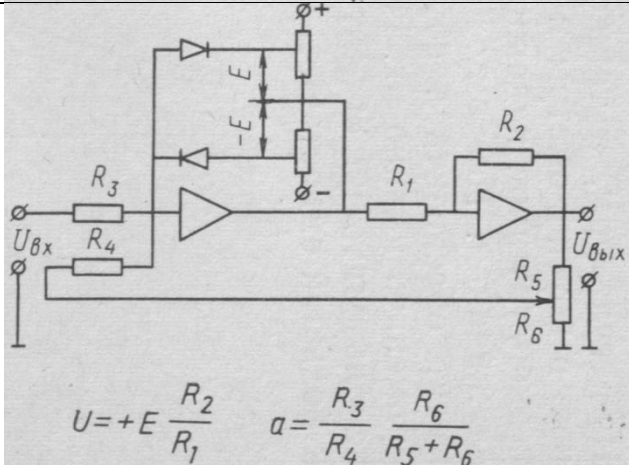


Рис. VI-6. Влияние изменения нагрузки объекта z на отношение $T_{вк}/T_{отк}$, кратность срабатывания регулятора n и относительное время периода автоколебаний $T_{кр}/\tau$.

Таблица VI.1. Схема моделирования релейных элементов

Название элемента и график, его статической характеристики	Схема моделирования	Аналитическая запись статической характеристики
Идеальный двухпозиционный Элемент 	 $U = E \frac{R_2}{R_1}$	$U_{\text{вых}} = \begin{cases} +U & \text{при } U_{\text{вх}} > 0 \\ -U & \text{при } U_{\text{вх}} < 0 \end{cases}$
Двухпозиционный элемент с зоной нечувствительности 	 $U = +E \frac{R_2}{R_1} \quad a = \frac{R_3}{R_4} \frac{R_6}{R_5 + R_6}$	$U_{\text{вых}} = \begin{cases} +U & \text{при } U_{\text{вх}} > +a \\ -U & \text{при } U_{\text{вх}} < -a \end{cases} \text{ если } \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} > 0$ $U_{\text{вых}} = \begin{cases} +U & \text{при } U_{\text{вх}} > -a \\ -U & \text{при } U_{\text{вх}} < +a \end{cases} \text{ если } \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} < 0$

Параметры автоколебаний в системах двухпозиционного регулирования могут быть также найдены методом моделирования. Схемы моделирования релейных элементов приведены в табл. VI.1.

2. Многоконтурные системы регулирования

Многие объекты химической технологии обладают существенным запаздыванием и характеризуются значительными возмущениями. Использование одноконтурных систем при автоматизации таких объектов не позволяет обеспечить высокого качества регулирования. Поэтому для повышения качества регулирования этих объектов используют более сложные АСР.

Каскадные АСР. В каскадных системах при регулировании основной технологической величины в объекте с большим запаздыванием используются также вспомогательные величины, реагирующие на изменение основных возмущений объекта и регулирующего воздействия с меньшим запаздыванием. В таких случаях стабилизация вспомогательных величин способствует более качественному регулированию основной величины. Каскадная система состоит из нескольких контуров регулирования, каждый из которых регулирует свою технологическую (основную или вспомогательную) величину. Однако применение каскадных схем эффективно только в том случае, когда запаздывание в контуре регулирования основной величины существенно больше, чем в контуре регулирования вспомогательной величины. При автоматизации химико-технологических объектов чаще всего используют двухконтурные каскадные системы.

Структурная схема двухконтурной системы приведена на рис. VI-7. В объекте регулирования ОР на основную y и вспомогательную y_1 технологические величины воздействуют регулирующая величина x и основное (наиболее сильное и быстро изменяющееся) возмущение z_1 . На величину y действует также небольшое и редкое возмущение z . Двухконтурная каскадная система имеет вспомогательный (стабилизирующий) контур регулирования и основной (корректирующий) контур. В стабилизирующий контур входит объект ОР (канал $x \rightarrow y$) и стабилизирующий регулятор $АР_1$ вырабатывающий регулирующее воздействие x . Корректирующий контур регулирования состоит из объекта (канал $x \rightarrow y$) и корректирующего регулятора $АР$ с независимым заданием u . На вход регулятора $АР$ поступает основная регулируемая величина y , а на вход регулятора $АР_1$ — вспомогательная величина y_1 . Выходная величина x_1 регулятора $АР$ направляется на регулятор $АР_1$ для изменения его задания. Стабилизирующий контур предназначен для регулирования вспомогательной величины y_1 , а корректирующий — основной величины y .

Обычно применяют следующие типы каскадных АСР: П—ПИ, ПИ—ПИ, ПИ—ПИД (первый регулятор является стабилизирующим, а второй — корректирующим).

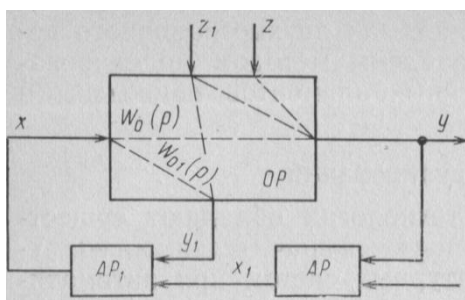


Рис. VI-7. Структурная схема двухконтурной каскадной системы: ОР — объект регулирования; ΔP — корректирующий регулятор; ΔP_1 — стабилизирующий регулятор.

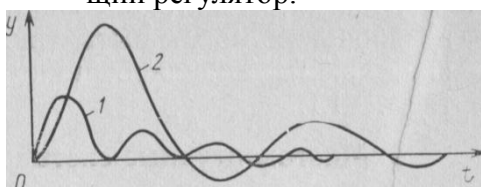


Рис. VI-8. Переходные процессы в каскадной П—ПИ системе (кривая 1) и одноконтурной ПИ системе (кривая 2) при одинаковом ступенчатом возмущении z_1

Возмущение z_1 приводит к изменению сначала вспомогательной величины y_1 а затем — основной величины y . Поэтому стабилизирующий контур регулирования быстрее, чем корректирующий, вступит в работу и выработает регулирующее воздействие, которое частично скомпенсирует отклонение величины y от заданного значения u . Нескомпенсированное отклонение величины y приведет в действие корректирующий контур регулирования, который постепенно скомпенсирует это отклонение. Влияние возмущения z на величину y подавляется корректирующим контуром регулирования. При этом стабилизирующий контур регулирования является быстродействующим, а корректирующий — медленнодействующим. Таким образом, применение стабилизирующего контура регулирования приводит к значительному повышению качества регулирования основной технологической величины.

Для иллюстрации этого положения на рис. VI-8 приведены сравнительные графики переходных процессов в каскадной системе, с П—ПИ-регуляторами (кривая 1) и одноконтурной системе с ПИ-регулятором (кривая 2), полученные при нанесении одинакового возмущения z_1 на один и тот же объект. В одном и другом случаях переходные процессы носят колебательный характер и не имеют статической ошибки регулирования. В то же время при использовании каскадной системы динамическая ошибка и время регулирования имеют меньшие значения. Уменьшается в несколько раз и интегральная квадратичная ошибка регулирования.

Отметим, что качество регулирования существенно улучшается с уменьшением соотношения времени запаздывания в стабилизирующем (τ_1) и корректирующем (τ) контурах. Поэтому, если есть возможность выбора вспомогательной величины, та предпочтение следует отдать той, при которой запаздывание в стабилизирующем контуре будет минимальным.

При реализации каскадных систем следует учитывать, что у многих объектов область технологически допустимых значений вспомогательной регулируемой величины y_1 которая задается корректирующим регулятором, ограничена и поэтому в схему необходимо вводить устройства для ограничения величины задания стабилизирующего регулятора.

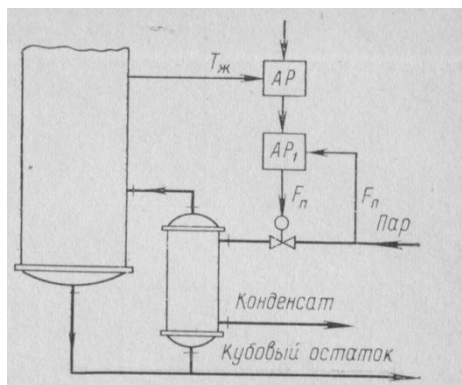


Рис VI-9. Схема двухконтурной каскадной АСР температуры в отгонной части ректификационной колонны.

Примером может служить двухконтурная система регулирования температуры низа ректификационной колонны, поддерживаемая изменением подачи греющего пара в кипятильник (рис. VI-9). Кипятильник представляет собой инерционный объект с большим запаздыванием. В таком случае применение одноконтурного регулирования температуры с воздействием на подачу пара в кипятильник обычно не обеспечивает высокого качества регулирования. Поэтому в схему вводят стабилизирующий контур регулирования расхода греющего пара; обладая большим быстродействием, этот контур компенсирует возмущения по изменению как расхода, так и давления греющего пара. Остальные возмущения компенсируются регулятором температуры, который воздействует на задатчик регулятора расхода.

На рис. VI-10 приведена двухконтурная АСР температуры в химическом реакторе посредством изменения расхода охлаждающей жидкости в рубашке реактора. С целью обеспечения более высокого качества регулирования, в схему введен стабилизирующий контур, в который входит регулятор AP_1 поддерживающий температуру охлаждающей жидкости T_c в рубашке реактора. Значение этой температуры задается регулятором AP корректирующего контура регулирования температуры реакционной смеси T_p в реакторе.

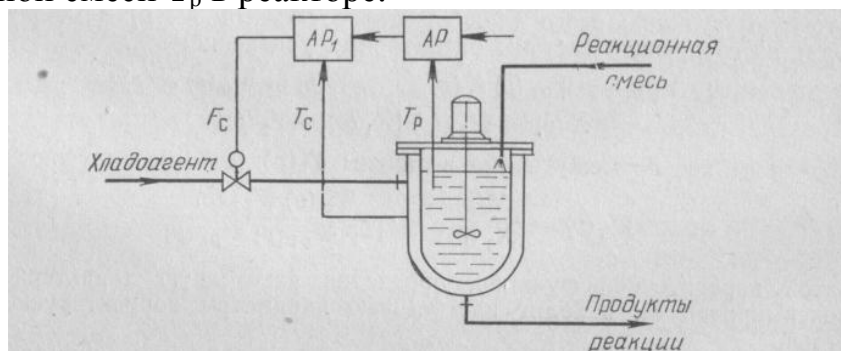


Рис. VI-10. Схема двухконтурной каскадной АСР температуры в химическом реакторе.

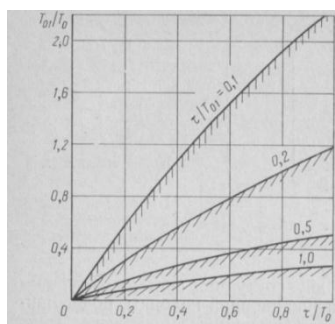


Рис. VI-11. График, иллюстрирующий области динамической взаимонезависимости стабилизирующего и корректирующего контуров каскадной АСР типа П—ПИ: τ_1 , τ , T_{01}

T_Q — запаздывания и постоянные времени объекта по стабилизирующему и корректирующему контуру соответственно.

Выбор типов стабилизирующего и корректирующего регуляторов каскадных АСР, а также определение оптимальных значений их настроечных параметров представляет собой более сложную задачу, чем в случае одноконтурных АСР. Так как по инерционности корректирующий контур существенно превосходит стабилизирующий, можно предположить, что в стабилизирующем контуре заканчивается переходный процесс раньше, чем он возникает в корректирующем. При этом условии выбор регуляторов и расчет их настроечных параметров можно проводить раздельно, как для двух одноконтурных АСР.

Влияние свойств объекта на области динамической взаимонезависимости стабилизирующего и корректирующего контуров для каскадной П—ПИ системы, для случая, когда расчет настроек регуляторов можно проводить независимо одна от другой, проиллюстрировано на рис. VI-11. Границы областей заштрихованы с той стороны, где можно выполнять раздельный расчет настроечных параметров регуляторов. При этом возможны два варианта.

При расчете по первому варианту стабилизирующий контур рассматривают как составную часть технологического объекта. Тогда, принимая $X_1 \approx \text{const}$, и пользуясь методами, изложенными в гл. V, рассчитывают параметры стабилизирующего регулятора; затем определяют настройку корректирующего регулятора по свойствам эквивалентного объекта, состоящего из объекта и уже рассчитанного стабилизирующего контура регулирования. Передаточную функцию этого эквивалентного объекта $W_3(p)$ (см. рис. VI-7) находят из следующей системы операторных уравнений:

$$\begin{aligned} Y_1(p) &= W_{01}(p)X(p) & Y(p) &= W_0(p)X(p) \\ X(p) &= W_{p1}(p)[X_1(p) - Y_1(p)] \end{aligned}$$

Исключая из нее промежуточные величины $Y_1(p)$ и $X(p)$, получают

$$W_3(p) = \frac{Y(p)}{X_1(p)} = \frac{W_0(p)W_{p1}(p)}{1+W_{01}(p)W_{p1}(p)} \quad (\text{IV, 13})$$

По этой передаточной функции, определив переходную характеристику и аппроксимировав ее, находят настроечные параметры корректирующего регулятора.

При расчете по второму варианту сначала определяют оптимальные параметры настройки корректирующего регулятора, а затем стабилизирующего.

Предполагая, что стабилизирующий регулятор практически успевает отслеживать вспомогательную величину y_1 в соответствии с поступающим на него заданием x_1 , т. е., что $y_1 \approx x_1$, передаточную функцию эквивалентного объекта $W_3(p)$ для корректирующего регулятора можно найти из системы уравнений:

$$Y_1(p) = W_{01}(p)X(p) \quad Y(p) = W_0(p)X(p) \quad Y_1(p) \approx X_1(p)$$

Исключив переменные $X(p)$ и $Y(p)$ получим

$$W_3(p) = \frac{Y(p)}{X_1(p)} \approx \frac{W_0(p)}{W_{01}(p)} \quad (\text{VI, 14})$$

Используя эту зависимость, рассчитывают параметры настройки корректирующего регулятора, а затем переходят к расчету настроек стабилизирующего регулятора. Для него передаточная функция эквивалентного объекта $W_{31}(p)$ имеет вид:

$$W_{31}(p) = W_{01}(p) + W_0(p)W_p(p) \quad (\text{VI, 15})$$

Во многих случаях влияние второго слагаемого в этом равенстве мало и его можно не принимать во внимание. Тогда $W_{31}(p) = W_{01}(p)$.

Если при эксплуатации каскадной АСР возможно отключение корректирующего регулятора, то применяют первый вариант расчета параметров настройки его регуляторов, если же стабилизирующего регулятора, то — второй вариант. Изложенные варианты расчета настроечных параметров сопровождаются громоздкими вычислениями и позволяют найти параметры обоих регуляторов только последовательно.

Для одновременного определения настроечных параметров регуляторов типовых каскадных АСР можно использовать зависимости, приведенные на рис. VI-12, VI-13 и VI-14. Оптимальные параметры регуляторов определяются по известным значениям следующих параметров объекта: время запаздывания в стабилизирующем (τ_1) и корректирующем (τ) контурах, коэффициент передачи (k_{01}) и постоянная времени (T_{01}) стабилизирующего контура. По найденным с помощью графиков числовым значениям относительных величин, отложенных по осям ординат, вычисляют: в случае П—ПИ системы — коэффициенты передачи стабилизирующего k_{p1} и корректирующего k_p регуляторов, а также время интегрирования T и корректирующего регулятора; в случае ПИ—ПИ системы — коэффициенты передачи (k_{p1} и k_p) и времена интегрирования (T_{u1} и T_u) соответственно для стабилизирующего и корректирующего регуляторов. В дополнение к этим параметрам в ПИ—ПИД системе определяют время дифференцирования T_d корректирующего регулятора. Полученные значения настроечных параметров регуляторов соответствуют оптимальному переходному процессу, обеспечивающему $\min \int_0^\infty y^2 dt$

Значения настроечных параметров регуляторов в каскадных АСР могут быть также найдены путем моделирования систем на АВМ. Принципы набора схемы модели системы аналогичны используемым при исследовании одноконтурных АСР. Значения параметров настройки регуляторов определяются путем их организованного поиска.

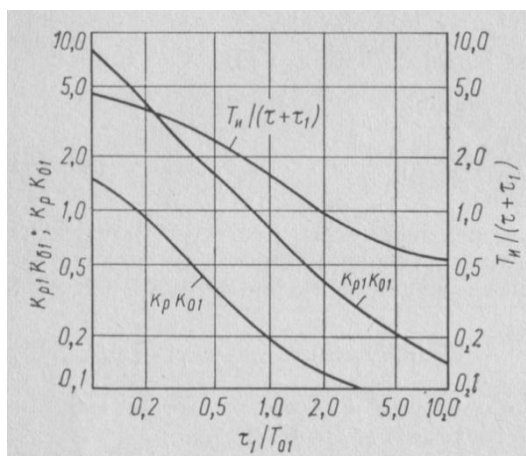


Рис. VI-12. График оптимальных значений настроечных параметров регуляторов каскадной АСР типа П—ПИ:

k_{01} — коэффициент передачи объекта по стабилизирующему контуру; k_p и k_{p1} — коэффициенты передачи корректирующего и стабилизирующего регуляторов соответственно; T_n — время интегрирования корректирующего регулятора; остальные обозначения см. рис. VII-11.

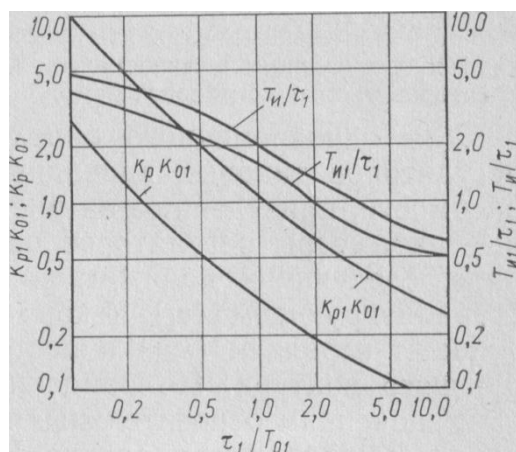


Рис. VI-13. График оптимальных значений настроечных параметров регуляторов каскадной АСР типа ПИ—ПИ:

— время интегрирования стабилизирующего регулятора; остальные обозначения см. рис. VI-12.

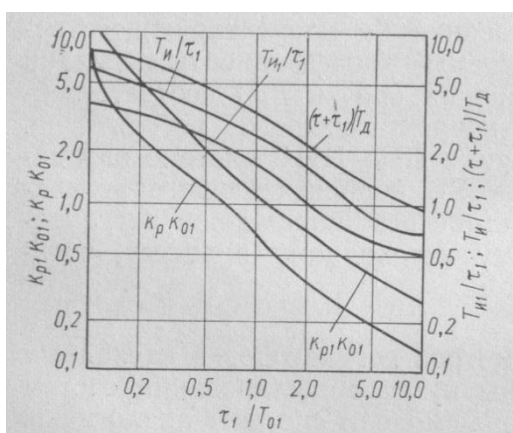


Рис. VI-14. График оптимальных значений настроечных параметров регуляторов каскадной АСР типа ПИ—ПИ:

T_d — время интегрирования стабилизирующего регулятора; остальные обозначения см. рис. VI-12.

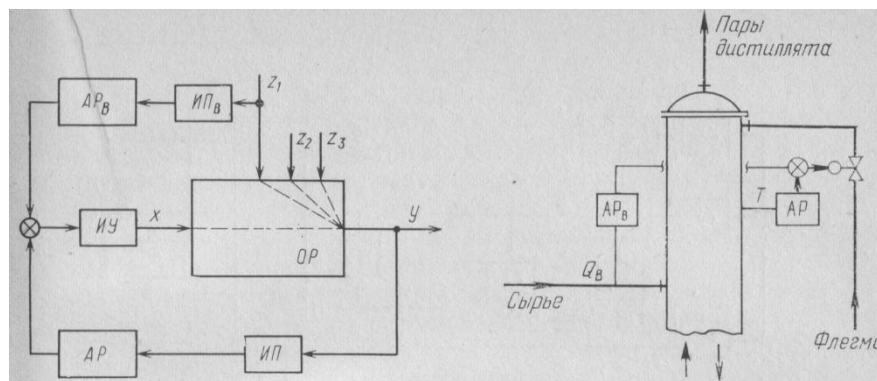


Рис. VI-15. Структурная схема комбинированной системы регулирования: ОР — объект регулирования; ИП, ИП_в — измерительные преобразователи; АР — автоматический регулятор; АР_в — автоматический регулятор по возмущению; ИУ — исполнительное устройство.

Рис. VI-16. Схема комбинированной системы регулирования температуры верха ректификационной колонны, учитывающая изменение состава исходной смеси.

Комбинированные АСР реализуют комбинированный принцип регулирования (см. гл. I). Структурная схема такой системы, учитывающей одно возмущение, приведена на рис. VI-15. Текущие значения регулируемой величины y и возмущения z_x подаются соответственно через измерительные преобразователи ИП и ИП_в на автоматические регуляторы АР и АР_в. После алгебраического суммирования выходы этих регуляторов направляются на вход объекта в качестве управляемой величины x . Воздействие на объект осуществляется по двум каналам: разомкнутому и замкнутому. С помощью разомкнутого канала обеспечивается быстрое воздействие на объект еще до отклонения регулируемой технологической величины от заданного значения, а с помощью замкнутого канала обратной связи осуществляется качественное поддержание регулируемой величины на заданном значении посредством текущего контроля ошибки регулирования.

Пример комбинированной системы приведен на рис. VI-16. Система предназначена для регулирования температуры на контрольной тарелке укрепляющей части ректификационной колонны, которое осуществляется регулятором АР, изменяющим подачу флегмы в колонну. На расход флегмы также воздействует контур регулирования по возмущению (регулятор АР_в), компенсирующий основное возмущение объекта — изменение состава сырья колонны.

Каскадно-комбинированные АСР. В некоторых случаях применяют также каскадно-комбинированные системы регулирования, имеющие, как минимум, три контура: стабилизирующий, корректирующий и осуществляющий регулирование по возмущению

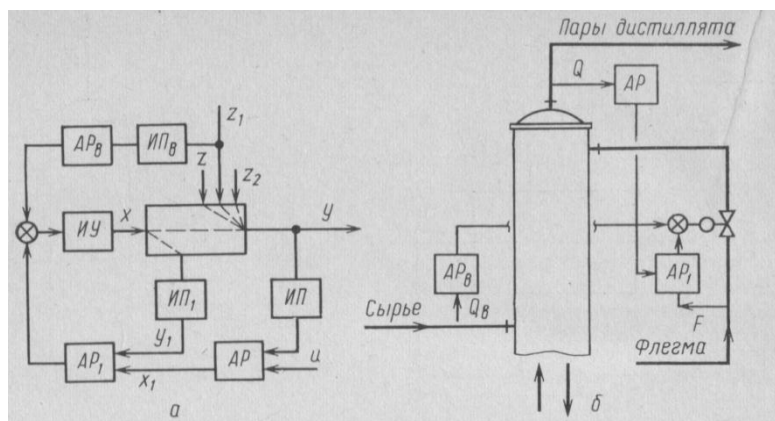


Рис. VI-17. Структурная (а) и принципиальная (б) схемы каскадно-комбинированной системы регулирования.

(рис. VI-17, а). Так при регулировании состава паров дистиллята, отводимых из верха колонны (регулятор AP) для повышения качества регулирования используют быстродействующий стабилизирующий контур регулирования расхода флегмы в колонну (регулятор AP_1), а также контур регулирования по возмущению (регулятор AP_B), учитывающий изменение состава сырья, поступающего в колонну (рис. IV-17, б).

Системы регулирования соотношения относятся к следящим системам (см. гл. I). Так, исходная смесь и флегма должны поступать в ректификационную колонну в определенном соотношении. При этом ведущей технологической величиной является расход смеси, а ведомой — расход флегмы. Это реализуется с помощью регулятора соотношения, который воздействует на расход флегмы. Аналогично регулируют соотношения следующих расходов: топливо и воздух в процессах горения; два вещества, подаваемые в химический реактор; сырье и пар, подаваемые в трубчатые печи пиролиза углеводородов, и др.

Иногда используют схемы регулирования, в которых предусмотрено изменение соотношения двух расходов в зависимости от текущего значения третьей технологической величины. Например, соотношение расходов топливного газа и воздуха, подаваемых в трубчатую печь, корректируют по содержанию кислорода в дымовых газах.

3. Экстремальные системы регулирования

В ряде случаев оптимальный режим работы химико-технологического объекта характеризуется экстремальным значением либо технологической величины (температура в реакторе, концентрация определенного компонента в сложной газовой смеси и др.), либо одной из технико-экономических величин (КПД

объекта или технологической установки, себестоимость получаемого продукта, затраты энергии на выработку единицы продукции, расход ценного агента при заданной производительности установки и др.). В таких случаях статическая характеристика объекта имеет экстремальный вид. Ее форма, а также экстремальные значения показателя- эффективности зависят от многих входных величин и изменяются во времени. Наряду с управляющими воздействиями на объект воздействует также целый ряд возмущений (например, состав сырья, теплотворная способность топлива, активность катализатора, степень износа оборудования, состояние окружающей атмосферы и др.). Учесть их влияние во времени обычными средствами не представляется возможным.

Значения управляющих воздействий, соответствующие экстремальному значению показателя эффективности объекта могут быть достигнуты только путем автоматического поиска. Для этого на вход технологического объекта сначала подают пробные воздействия и анализируют реакцию объекта на них, затем с учетом этого анализа изменяют входную величину, приближая выходную величину объекта к экстремальному значению. Пробные и рабочие воздействия подают на объект до достижения экстремума его статической характеристики. В дальнейшем выходная величина объекта начнет уменьшаться, вследствие чего произойдет реверс рабочих воздействий на его входе. В результате выходная величина объекта будет совершать колебательные движения около экстремального значения статической характеристики. Пробные и рабочие воздействия могут подаваться последовательно или даже совмещаться.

По способу поиска экстремальной точки статической характеристики объекта различают системы с запоминанием экстремума, с измерением производной, шагового типа и непрерывного действия.

В качестве примера рассмотрим работу системы с запоминанием экстремального значения регулируемой величины (рис. VI-18). Исполнительное устройство системы 1 (рис. VI-18, а) отрабатывает на входе объекта регулирования 2 регулирующее воздействие x . Текущее значение регулируемой величины y воспринимается измерительным преобразователем 3 системы и поступает, на экстремальный регулятор 4. Последний состоит из блока памяти БП, элемента сравнения ЭС, блока формирования импульса БИ, триггера Т, интегратора И и блока ограничений параметра БО.

Величина x (рис. 18,б), формируемая экстремальным регулятором 4, принудительно изменяется с постоянной скоростью. Если направление изменения x выбрано правильно, то текущая величина y постепенно достигает экстремального значения $y_{\max}$. При последующем изменении величины x в том же направлении регулируемая величина y начнет удаляться от экстремального значения, т.е. будет принимать меньшие значения.

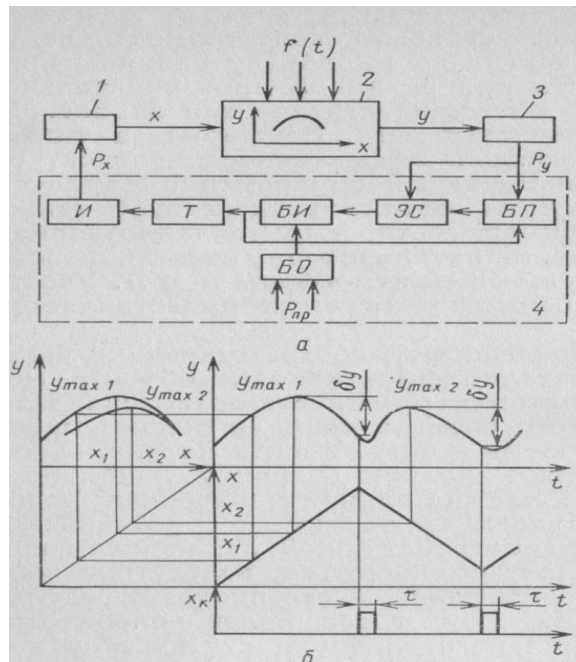


Рис. VI-18. Структурная схема (а) и график последовательности работы (б) экстремального регулятора непрерывного действия с запоминанием экстремума:

1 — исполнительное устройство; 2 — объект регулирования; 3 — измерительный преобразователь; 4 — экстремальный регулятор.

При этом экстремальное значение регулируемой величины запоминается экстремальным регулятором и в последующем сравнивается с текущими значениями. В момент, когда текущее значение регулируемой величины y примет значение, которое меньше запомненного, и рассогласование между ними станет больше зоны нечувствительности δy регулятора, последний вырабатывает командный сигнал x_k , который приводит к изменению направления перемещения величины x . При этом регулируемая величина снова начнет приближаться к экстремальному значению, достигнет его, а затем будет удаляться. Таким образом, вследствие принудительного изменения регулирующего воздействия x текущее значение y «рыскает» около экстремального значения статической характеристики объекта.

Отметим, что объекты химической технологии обычно обладают большой инерционностью, так что при реверсировании выходной величины регулятора x в течение некоторого времени будет продолжаться удаление регулируемой величины y от экстремального значения $y_{\max}$. Чтобы при этом не произошло ложного срабатывания регулятора предусматривается задержка его работы на время τ , соответствующая продолжительности командного сигнала x_k .

Аналогичным образом отыскивается экстремальное значение регулируемой величины при изменении формы статической характеристики объекта или ее перемещении в плоскости $y=f(x)$ под действием возмущающих воздействий.

В экстремальном регуляторе предусмотрено также реверсирование выходной величины x при превышении какими-либо другими технологическими величинами максимально допустимых значений.

Параметрами настройки этого регулятора являются зона нечувствительности δu , скорость изменения выходной величины dx/dt и время задержки срабатывания τ .

Экстремальные системы нашли применение для управления многими процессами. Так, например, они используются для поддержания максимального значения следующих регулируемых величин: степень окисления сернистого ангидрида SO_2 в серный ангидрид SO_3 при изменяющемся количестве газа, поступающего в контактный аппарат, и содержании кислорода и сернистого ангидрида в исходном газе; температура в топке трубчатой печи пиролиза при меняющейся теплотворной способности топлива.

Рассмотрим работу реактора прямой гидратации этилена. Процесс характеризуется экстремальной зависимостью относительного выхода спирта F от мольного отношения водяной пар — циркулирующий этилен M . При работе экстремальная статическая характеристика непрерывно изменяет свою форму и расположение в плоскости параметров F, M . Оптимальному режиму работы реактора соответствует экстремальная точка зависимости $F = f(M)$. Поэтому, принудительно воздействуя на величину M соответствующим образом, можно получать максимально возможный выход спирта. Для этого сигналы от измерительных преобразователей концентрации, скорректированные по плотности и температуре готового продукта, преобразуются в сигнал выхода абсолютного спирта. Эта величина подается на вход экстремального регулятора, который управляет работой регулятора мольного соотношения пар — этилен. Последний в свою очередь воздействует на регулирующий клапан, установленный на линии подачи водяного пара в тройник смешения.

4. Регулирование объектов с запаздыванием

Большинство объектов химической промышленности обладает существенным запаздыванием. К ним относятся тепловые объекты, объекты, в которых протекают тепло-массообменные процессы, объекты, связанные с перемещением сыпучих материалов, жидкостей, газов и паров. Значительное запаздывание имеют абсорбционные и ректификационные колонны, трубчатые печи и поверхностные теплообменники, ленточные транспортеры, длинные трубопроводы и т. д.

Объекты могут обладать запаздыванием по каналам возмущающего и регулирующего воздействий. Рассмотрим случаи, когда время запаздывания τ постоянно.

Если запаздывание имеет место по каналу возмущающего воздействия, то передаточная функция системы может быть записана в виде:

$$W_{yz}(p) = \frac{W_z(p)e^{-p\tau}}{1 - W_x(p)W_p(p)} \quad (\text{VI, 16})$$

где $W_z(p)$ и $W_x(p)$ — передаточные функции объекта по каналам соответственно возмущающего и регулирующего воздействия при отсутствии запаздывания; $W_p(p)$ — передаточная функция регулятора.

Из сопоставления уравнений (VI,16) и (IV,6) следует, что по сравнению с переходным процессом в системе без запаздывания наличие последнего сдвигает переходный процесс на время τ , не изменяя его формы, устойчивость и показатели качества

(при тех же значениях настроечных параметров регулятора) остаются прежними.

При запаздывании по каналу регулирующего воздействия передаточная функция системы принимает вид:

$$W_{yx}(p) = \frac{W_z(p)}{1 - W_x(p)e^{-p\tau}W_p(p)} \quad (\text{VI, 17})$$

В этом случае запаздывание осложняет задачу регулирования объекта; при этом быстродействие АСР уменьшается, качество-регулирования ухудшается, область устойчивости системы в плоскости настроечных параметров регулятора резко сокращается.

Для подтверждения последнего положения выделим области устойчивости одноконтурной замкнутой АСР, состоящей из устойчивого объекта 1-го. порядка с запаздыванием и ПИ-регулятора, передаточные функции которых имеют вид

$$W_0(p) = W_x(p)e^{-p\tau} = \frac{k_0}{Tp+1}e^{-p\tau} \quad (\text{VI, 18})$$

$$W_p(p) = k_p + \frac{1}{T_{\text{и}}p} \quad (\text{IV, 19})$$

при различных значениях τ .

Как известно, с учетом отрицательной обратной связи характеристическое уравнение этой системы имеет вид:

$$1 + W_0(p)W_p(p) = 0 \quad (\text{VI, 20})$$

Подставляя в него выражения передаточных функций объекта и регулятора, получим

$$\frac{k_0}{Tp+1}e^{-p\tau} \left(k_p + \frac{1}{T_{\text{и}}p} \right) = -1 \quad (\text{VI, 21})$$

Для нахождения границ устойчивости заменим в уравнении (VI,21) символ p на мнимую величину $i\omega$ и, освобождаясь от мнимости в знаменателе, найдем

$$\frac{k_0}{\sqrt{T^2\omega^2+1}}e^{i[-\arctg(T\omega)-\omega\tau]} \left(k_p - i\frac{1}{T_{\text{и}}\omega} \right) = -1 \quad (\text{IV, 22})$$

Для общности полученных результатов введем новые обозначения

$$T\omega = \kappa; \quad \frac{\tau}{t} = \alpha; \quad \frac{T_{\text{и}}}{T} = \gamma$$

и подставляя их в уравнение (VI,22), получим:

$$k_p - i\frac{1}{\gamma\kappa} = -\frac{\sqrt{\kappa^2+1}}{k_0}e^{i[(\arctg \kappa)+\alpha\kappa]} \quad (\text{VI, 23})$$

Представляя экспоненциальную функцию через тригонометрические

$$e^{+i\kappa} = \cos \kappa + i \sin \kappa$$

разделив уравнение (VI,23) на действительную и мнимую части и выделив искомые параметры системы, получим

$$k_p = -\frac{\sqrt{\kappa^2+1}}{k_0} \cos[(\arctg \kappa) + \alpha\kappa] \quad (\text{VI, 24})$$

$$\gamma = \frac{T_{\text{и}}}{T} = +\frac{k_0}{\kappa\sqrt{\kappa^2+1}} \cdot \frac{1}{\sin[(\arctg \kappa)+\alpha\kappa]} \quad (\text{VI, 25})$$

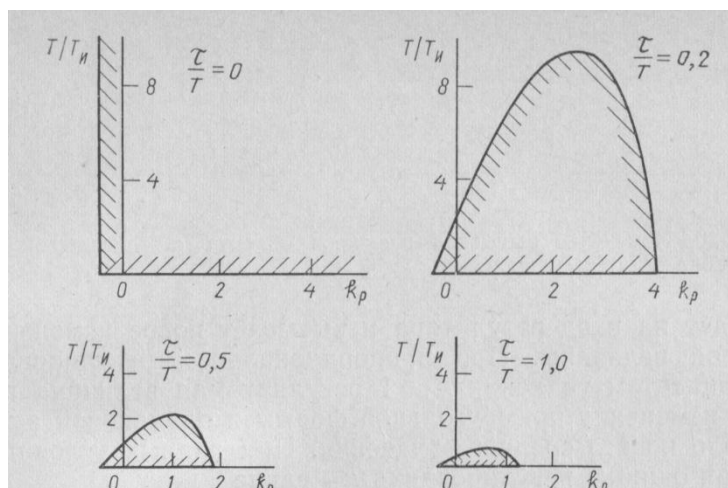


Рис. VI-19. Зависимость размеров области устойчивости АСР в плоскости параметров регулятора от запаздывания объекта.

Задаваясь значениями χ , при $k_0 = 2$, вычислим величины k_p и $1/\gamma$ для нескольких значений α . Полученные результаты, приведенные на рис. VI-19, показывают, что размеры области устойчивости системы сильно зависят от значения τ . При $\tau = 0$ система устойчива, если значения параметров настройки регулятора, находятся в интервалах $-0,5 < k_p < \infty$ и $0 < T/T_n < \infty$. При $\tau > 0$ область значений, параметров регулятора, при которых система устойчива намного меньше. С возрастанием отношения τ/T область устойчивости интенсивно сокращается. Можно также показать, что с возрастанием τ области параметров настройки регулятора, соответствующие определенным показателям качества процесса регулирования, также уменьшаются. Это свидетельствует о сокращении возможностей достижения переходного процесса с требуемыми по условиям технологии параметрами качества регулирования.

Рассмотрим работу систем, состоящих из объектов, обладающих только запаздыванием по каналам возмущающего и регулирующего воздействия, и регуляторов непрерывного действия с типовыми законами регулирования.

При пропорциональном регулировании передаточная функция системы

$$W(p) = \frac{e^{-p\tau}}{1+k_p e^{-p\tau}} \quad (\text{VI, 26})$$

позволяет найти изображение ее переходной характеристики:

$$L[h(t)] = \frac{e^{-p\tau}}{1+k_p e^{-p\tau}} \cdot \frac{1}{p} \quad (\text{VI, 27})$$

Оригинал этого изображения при $k=1$ приведен на рис. VI-20.

После нанесения возмущения при $t < \tau$ сигнал проходит по объекту и в момент $t = \tau$ появляется на его выходе, вызывая срабатывание П-регулятора. Появившееся регулирующее воздействие проходит через объект также за время τ и вызывает новое изменение регулируемой величины, которое в момент 2τ

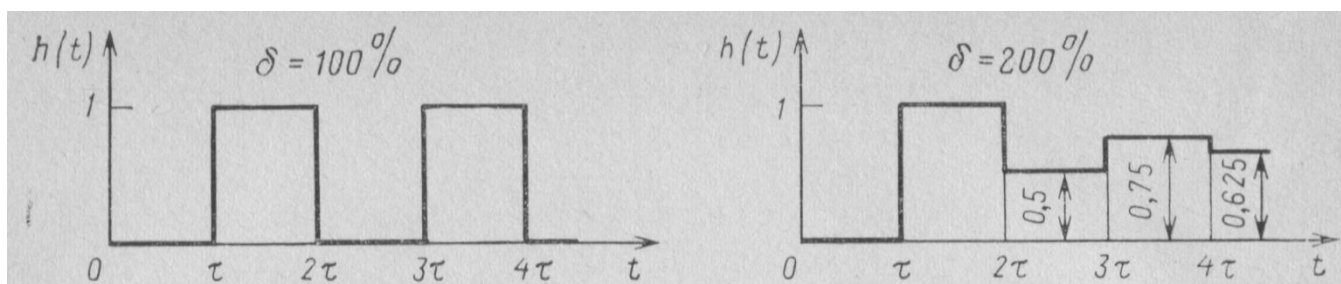


Рис. VI-20. Изменение выходной величины объекта с запаздыванием при пропорциональном регулировании.

поступает на вход регулятора и вызывает новое изменение его выходной величины. При пропорциональном регулировании с коэффициентом усиления $k_p = 1$ регулируемая величина претерпевает изменения прямоугольной формы и одинаковой амплитуды около нового среднего значения. При данных условиях статическая ошибка регулирования $y_{ст}$ равна

$$y_{ст} = \frac{k_0}{1 + k_0 k_p} = \frac{1}{1 + 1 \cdot 1} = 0.5$$

Период изменений регулируемой величины равен 2τ . Таким образом, при $k_p = 1$ система находится на границе устойчивости.

Для повышения устойчивости системы необходимо уменьшить воздействие регулятора на объект. Оригинал изображения (VI,27) при $k_p = 0,5$ или $\delta = 200\%$ также показан на рис. VI-20. При возмущении $l(t)$ регулируемая величина претерпевает изменения прямоугольной формы с тем же периодом. Но при этом статическая ошибка регулирования возрастает до значения $y_{ст} = 0,666$, а амплитуда колебаний уменьшается. Амплитуда каждой последующей полуволны вдвое меньше, чем у предыдущей, следовательно при $\delta = 200\%$ перерегулирование в переходном процессе равно $\phi = 0,5$. И в этом случае с увеличением предела пропорциональности δ динамические показатели процесса улучшаются, а статические — ухудшаются.

В реальных системах, обладающих инерционностью отдельных элементов, будут возникать колебания синусоидальной формы, однако установленные выше основные закономерности сохраняются.

Применение И-регулятора приводит к появлению в системе гармонических колебаний, период которых равен 4τ ; это превышает в 2 раза аналогичную величину, возникающую при П-регулировании, но не дает статической ошибки регулирования. Если время интегрирования регулятора $T_{и} = 2\tau/\pi$, то в системе возникают колебания с постоянной амплитудой. Демпфирования амплитуды колебаний можно достигнуть увеличением $T_{и}$. Для получения в контуре регулирования затухающих колебаний, при которых $\phi = 0,5$, время интегрирования $T_{и}$ должно быть равно $T_{и} = 4\tau/\pi$, т. е. увеличено в 2 раза.

При ПИ-регулировании в системе также возникают колебания регулируемой величины. Период этих колебаний $T_{н}$ может

находиться в пределах $2\tau < T_n < 4\tau$ и зависит от установленных значений δ и T_i регулятора. В такой системе колебания с перерегулированием $\varphi = 0,5$ получают при определенных комбинациях значений δ и T_i , зависимость которых от отношения T_n/τ приведена на рис. VI-21.

Существует несколько методов повышения качества регулирования в системах с запаздыванием. Одним из наиболее распространенных является введение в систему регулирования дополнительного внутреннего контура стабилизации некоторой промежуточной технологической величины объекта, т. е. применение каскадных АСР, работа которых рассмотрена выше.

При выборе типового закона регулирования объекта с запаздыванием следует учитывать следующее. При И-регулировании величина интегральной ошибки регулирования примерно вдвое больше, чем при ПИ-регулировании. П-регулирование сопровождается наличием значительной статической ошибки регулирования, но по сравнению с ПИ-регулированием — меньшими отклонениями регулируемой величины в переходном режиме. Введение дифференциальной составляющей в закон регулирования увеличивает воздействие регулятора на объект и приводит к уменьшению запаса устойчивости системы. Таким образом, для регулирования объектов с запаздыванием предпочтительнее использовать П- или ПИ-регуляторы. Однако в этом случае предел их пропорциональности должен быть установлен значительно большим, чем при регулировании объектов без запаздывания, т. е. воздействие регулятора на объект должно быть меньше.

Для определения требуемого значения предела пропорциональности регулятора (δ) снимают переходную характеристику объекта (рис. VI-22), проводят касательную к точке ее перегиба

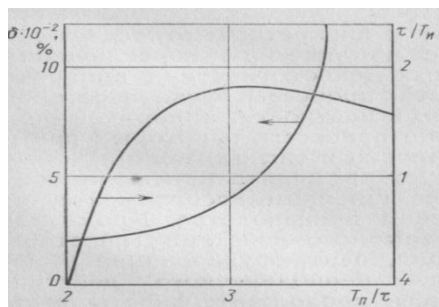


Рис. VI-21. Зависимость параметров настройки ПИ-регулятора от относительного периода колебаний T_n/τ , если регулятор установлен на объекте с запаздыванием τ , а перерегулирование φ переходного процесса равно 0,5.

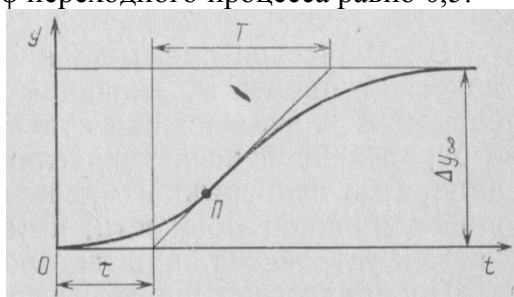


Рис. VI-22. Вспомогательный график для определения предела пропорциональности регулятора.

и по отсекаемым ею на осях координат отрезкам численно определяют свойства объекта. Величину (δ) находят по зависимости

$$\delta = k \Delta y_{\infty} \frac{\tau}{T} 100\%$$

где Δy_{∞} — установившееся отклонение регулируемой величины; τ — время запаздывания; T — постоянная времени объекта; k — коэффициент пропорциональности, обычно принимается, что $k=2$.

Таким образом, значение предела пропорциональности регулятора пропорционально отношению времени запаздывания τ к показателю нарастания B :

$$B = \frac{1}{\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\max}} = \frac{1}{\frac{\Delta y_{\infty}}{T}}$$

Перспективным для регулирования объектов с запаздыванием является применение управляющих ЭВМ, работающих в импульсных режимах. Период чередования импульсов должен находиться в соответствии с временем запаздывания объекта. Импульсное воздействие на объект существенно уменьшает длительность переходного процесса и установившееся отклонение регулируемой величины.

Для регулирования объектов с переменным запаздыванием обычно используют системы усложненной структуры, в которые введены корректирующие устройства.

5. Системы управления дискретными процессами

В химической промышленности к дискретным относят периодические процессы, связанные с циклическим переключением операций и включением отдельных технологических аппаратов в определенной последовательности; процессы пуска и останова аппаратов непрерывного действия, в частности, аппаратов большой единичной мощности; а также процессы, в которых применяются устройства защиты, блокировки и сигнализации.

Периодические процессы следует применять при малом объеме выпускаемой продукции и ее широком ассортименте, например, в химико-фармацевтическом производстве. Кроме того на технологических схемах непрерывного действия (некоторые реакционные процессы, фильтрация, центрифугирование и др.) иногда используется оборудование периодического действия. Различают периодические процессы, продолжительность операций которых заранее известна, и такие, длительность операций которых определяется протеканием самого процесса и изменяется во времени.

Для автоматизации дискретных процессов используют циклические и логические системы управления.

Циклические системы управления предназначены для реализации заданной последовательности выполнения технологических операций по жесткой временной программе. С этой целью обычно применяют различные реле времени и командные приборы.

Так, например, в производстве синтетического каучука при дегидрировании бутиленов в реакторе с неподвижным слоем катализатора последний быстро закоксуывается и его периодически необходимо — регенерировать. С целью непрерывной переработки продукта в технологической схеме предусматривают два реактора, один из которых работает в режиме контактирования, а другой — регенерации. При этом процесс проводят в циклическом режиме. Сначала в течение 15 мин ведут процесс контактирования. Затем после продувки водяным паром в реактор подают паровоздушную смесь и выжигают кокс, отложившийся при контактировании. После регенерации реактор снова продувают паром и начинают следующий период контактирования. Продолжительность полного цикла составляет 30 мин. Смена реакторов и переключение технологических потоков выполняются автоматически с помощью командного прибора, который через заданные промежутки времени включает в работу быстродействующие задвижки, установленные на соответствующих трубопроводах. Порядок работы реакторов обычно задают в виде циклограммы, по оси ординат которой условно показывают соответствующие исполнительные устройства, а по оси абсцисс (ось времени) — моменты их включения и отключения.

Логические системы управления предназначены для автоматизации периодических процессов, продолжительность операций которых определяется самим процессом. Они обеспечивают передачу сигналов в заданной логической последовательности от измерительных преобразователей, воспринимающих информацию о состоянии объекта, к исполнительным устройствам, воздействующим на процесс.

Эти системы применяют, когда необходимо выбрать оптимальную стратегию переключения аппаратов в период проведения технологического процесса. При этом алгоритм переключения основывается на анализе возможных ситуаций, возникающих в ходе эксплуатации оборудования в разных режимах. При использовании логических систем управления необходимо иметь объективные методы индикации момента окончания соответствующего этапа для того, чтобы по сигналу индикаторов включать следующие по ходу процесса технологические операции.

Любую логическую систему управления представляют в виде системы уравнений алгебры логики и схемы реализации последней на электронных, пневматических, электро-механических и других устройствах релейного типа. Для текущей информации о процессе используют сигналы двух уровней «0» и «1», соответствующие двум возможным установившимся состояниям технологической величины. Состояние объекта в целом в каждый момент времени характеризуют совокупность дискретных («0» или «1») значений технологических величин в виде таблицы состояний. При этом, каждый набор указанных

(входных) сигналов будет соответствовать определенным дискретным значениям выходных или управляющих сигналов. Взаимосвязь входных и управляющих сигналов выражают посредством таблицы включений. Набор выходных сигналов, вырабатываемых на некоторый момент времени, часто зависит не только от входных сигналов, поданных в тот же период, но и от сигналов, поступивших ранее — это учитывается системами управления, имеющими память.

На основе таблиц включения (в простейших случаях) или путем анализа логических взаимосвязей величин и выбранной стратегии управления (в более сложных ситуациях), используя элементарные функции алгебры логики («Не», «И», «Или»), формируют алгоритм управления процессом (порядок переключения операций).

Логические системы управления используют также при пуске и останове аппаратов непрерывного действия. Кроме того, эти системы применяют при необходимости защиты и блокировки оборудования и сигнализации о наступлении тех или иных режимов протекания процессов в аппаратах.

Системы автоматической защиты предназначены для предотвращения аварий на производстве. Так, при превышении допустимого давления в аппарате срабатывает предохранительный клапан и сообщает аппарат с атмосферой, при этом давление в нем резко снижается.

При необходимости аварийной защиты аппарата по нескольким технологическим величинам составляют логическую систему, в которой сигналы от измерительных преобразователей подаются на элементы сравнения. При превышении какой-либо величиной установленного для него предельного значения на выходе соответствующего элемента сравнения появляется сигнал «1», который поступает в многоходовый блок «Или». Сигнал с выхода последнего направляется на исполнительные устройства объекта и производит их переключения, обеспечивающие аварийную защиту оборудования.

Для предотвращения неправильной последовательности включений и выключений механизмов, машин и аппаратов используют системы блокировки. Например, включение нескольких транспортеров, работающих последовательно, должно производиться против хода потоков, а их отключение — в обратном порядке. В противном случае произойдет нарушение работы оборудования.

Для автоматического оповещения обслуживающего персонала о недопустимости тех или иных событий в управляемом объекте применяют системы сигнализации, которые при достижении контролируемыми или регулируемыми величинами заранее установленных значений включают соответствующие сигнальные лампы или звуковые сигналы.

ГЛАВА VII

АВТОМАТИЗАЦИЯ

ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

При автоматизации химико-технологических процессов и производств технологическое оборудование оснащается приборами, регуляторами, управляющими машинами и другими устройствами. Для этого тщательно изучается технологический процесс, выявляются величины, влияющие на его протекание, находятся взаимосвязи между ними. В соответствии с заданной целью составляется схема регулирования или управления технологическим процессом. При необходимости ослабления или учета внутренних взаимосвязей, а также повышения качества регулирования используют многоконтурные системы или управляющие вычислительные машины.

Ниже даются основные сведения о проектировании, приводятся условные изображения средств автоматизации на схемах и чертежах, рассматриваются наиболее распространенные схемы автоматизации гидромеханических, тепловых и массообменных процессов; даются также понятия об автоматизированных системах управления технологическими процессами; кратко рассматриваются вопросы экономической эффективности систем автоматизации.

1. Проектирование систем и изображение средств автоматизации на функциональных схемах

Проектирование. Созданию систем автоматизации любого технологического процесса всегда предшествует разработка проектной документации. Перед проектированием систем автоматизации обычно составляют функциональную схему технологического процесса, на которую наносят чувствительные элементы, приборы, регуляторы, вычислительные устройства и другие средства автоматизации, необходимые для оснащения данного процесса. При этом выбирают методы измерения технологических величин и технические средства автоматизации, наиболее полно отвечающие требованиям, предъявляемым к условиям работы автоматизируемого объекта; размещают средства автоматизации на щитах, пультах, технологическом оборудовании, трубопроводах и т. д.; определяют способы информации о состоянии технологического процесса и оборудования.

Разработку функциональных схем и выбор технических средств автоматизации выполняют с учетом условий пожаро- и

взрывоопасности процесса; агрессивности и токсичности окружающей среды; параметров и физико-химических свойств измеряемой среды; дальности передачи сигналов информации от места установки измерительных преобразователей, вспомогательных устройств, исполнительных устройств и т. д. до пунктов управления и контроля; требуемой точности и быстродействия приборов и регуляторов.

Системы автоматизации технологических процессов должны строиться, как правило, на базе серийно выпускаемых средств автоматизации и вычислительной техники. При этом следует применить однотипные устройства и унифицированные системы, характеризующиеся простотой сочетания. Преимущественно необходимо использовать устройства Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП). По возможности ограничивают число приборов, аппаратуры управления и сигнализации, устанавливаемых на щитах и пультах.

Перед проектированием систем автоматизации составляется задание на проектирование с необходимыми исходными данными.

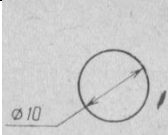
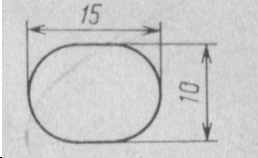
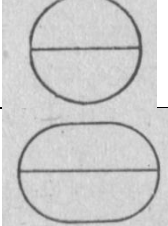
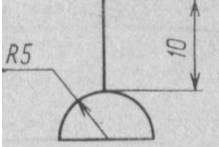
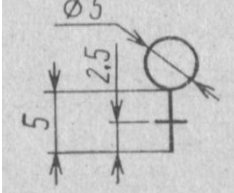
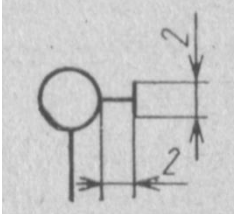
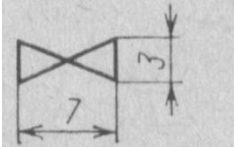
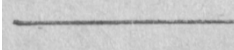
Исходные данные на проектирование должны содержать технологические схемы с характеристиками оборудования и трубопроводными коммуникациями; перечни контролируемых и регулируемых величин с соответствующими чертежами технологического оборудования и производственных помещений; схемы водоснабжения, воздухообеспечения; требования к надежности систем автоматизации и т. д.

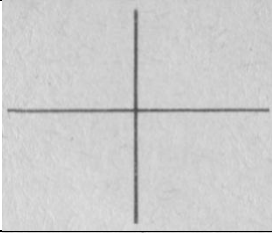
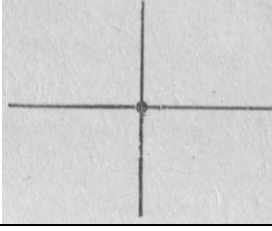
Проектирование систем автоматизации обычно выполняют в две стадии: технический проект и рабочие чертежи.

Стадии проектирования. На стадии технического проекта разрабатываются структурные схемы комплекса технических средств, планы расположения щитов и пультов, технические требования к созданию нестандартного оборудования, сметы на приобретение и монтаж средств автоматизации и т. д. На стадии рабочих чертежей разрабатываются: структурные схемы управления и контроля; функциональные схемы процесса; принципиальные пневматические, электрические и гидравлические схемы контроля, регулирования, сигнализации и др.; общие виды щитов и пультов, их монтажные схемы; пояснительная записка и т. д.

Изображение приборов и средств автоматизации на схемах производится в соответствии с ОСТ 36—27—77 «Обозначения условные в схемах автоматизации технологических процессов». Стандарт устанавливает условные графические обозначения приборов и средств автоматизации, а также обозначения измеряемых величин и функциональных признаков приборов..

Графические условные обозначения приборов и средств автоматизации с размерами приведены ниже:

Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент); прибор, устанавливаемый по месту, на технологическом трубопроводе, аппарате, стене, полу, колонне, металлоконструкции: основные допустимые		
		
Прибор, устанавливаемый на щите, пульте: основные допустимые		
Отборное устройство без постоянно подключенной части (служит для эпизодического подключения Приборов во время наладки, снятия характеристик и т. и.)		
Исполнительный механизм (общее обозначение). Положение регулирующего органа при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала не регламентируется		
Исполнительный механизм, открывающий регулирующий орган при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала		
Исполнительный механизм, закрывающий регулирующий орган при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала		
Исполнительный механизм, оставляющий регулирующий орган в неизменном положении при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала		
Исполнительный механизм с дополнительным ручным приводом (обозначение может применяться в сочетании с любым из дополнительных знаков, характеризующих положение регулирующего органа при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала)		
Регулирующий орган		
Линия связи		

Пересечение линий сняли без соединения	
Пересечение линий связи при наличии соединения	

Условные обозначения располагают на основном поле технологической схемы и в двух прямоугольниках, которые располагают в нижней части листа.

Способы изображения. Стандарт устанавливает упрощенный и развернутый варианты построения условных графических обозначений.

. Упрощенный способ применяют для изображения па технологических схемах приборов и схем регулирования в целом. При этом многофункциональные приборы и средства автоматизации, выполненные в виде отдельных блоков, изображают одним условным обозначением и располагают па поле чертежа вблизи места измерения технологической величины, а первичные измерительные преобразователи и вспомогательную аппаратуру не показывают.

Развернутый способ построения условных графических обозначений применяют для выполнения функциональных схем автоматизации. В этом случае все приборы и блоки, входящие в конкретную схему, показывают отдельными условными обозначениями.

Толщина линий (в мм), используемых в графических условных обозначениях па схемах, составляет:

Приборы и средства автоматизации..... 0,5—0,6

Горизонтальная разделительная черта внутри обозначения, а также линии связи..... 0,2—0,3

Контуры технологического оборудования и трубопроводные коммуникации..... 0,6—1,5

Отборное устройство специально не обозначается, а представляется в виде тонкой сплошной линии, соединяющей технологический трубопровод или аппарат с измерительным преобразователем или прибором. В случае необходимости точное место расположения отборного устройства или точка измерения (внутри контура технологического аппарата) изображается окружностью диаметром 2 мм и располагается в конце соединительной линии.

Регулирующие органы с исполнительными механизмами устанавливаются на технологических трубопроводах.

ТАБЛИЦА VII.1. Основные условные обозначения измеряемых и регулируемых величин

Наименование величины	Обозначение
Основное значение	
Температура	<i>t</i>
Давление, разрежение	<i>p</i>
Расход	<i>F</i>
Уровень	<i>L</i>
Состав смеси, концентрация вещества*	<i>Q</i>
Плотность	<i>D</i>
Влажность	<i>M</i>
Вязкость	<i>V</i>
Радиоактивность	<i>R</i>
Любая электрическая величина*	<i>E</i>
Размер, положение, перемещение	<i>G</i>
Ручное воздействие	<i>u</i>
Время, временная программа	<i>K</i>
Несколько разнородных измеряемых величин*	<i>u</i>
Уточняющее значение	
Разность, перепад	<i>D, d</i>
Соотношение, доля, дробь	<i>F,</i>
	<i>f</i>
Автоматическое переключение, обегание	<i>I</i>
Итерирование	

* Конкретизация и расшифровка измеряемых величин [рН, C₄H₈, CO₂, напряжение, сила тока, $U=f(F, P)$] выполняются на поле чертежа около обозначения прибора.

Чувствительные элементы и первичные преобразователи систем измерения или регулирования располагают непосредственно на трубопроводах или вблизи технологического оборудования. Промежуточные преобразователи, измерительные приборы, регуляторы, сигнализаторы и т. п., устанавливаемые в цехе по месту, размещаются в нижней части листа технологической схемы процесса в прямоугольнике, озаглавленном слева «Приборы местные». Еще ниже — в прямоугольнике, озаглавленном слева «Щит», располагаются средства автоматизации, которые устанавливают на пультах управления, на щитах и за ними, в операторной или в помещении управления. Многофункциональные устройства изображают несколькими окружностями, касающимися одна другой.

Условные обозначения измеряемых и регулируемых величин, используемые при обоих способах построения, приведены в табл. VII. 1, а обозначения функциональных признаков приборов и регуляторов — в табл. VII.2.

Построение основных условных обозначений средств автоматизации выполняют следующим образом. В верхней части графического изображения (окружность) наносят буквенные обозначения измеряемой величины и функциональных признаков

Таблица VII.2. Условные обозначения функциональных признаков приборов и регуляторов

Наименование функционального признака	(> п<> значение
Основное	
Показание	<i>I</i>
регистрация	<i>R</i>
Регулирование, управление	<i>C</i>
Включение, отключение, переключение	<i>S</i>
Сигнализация	<i>A</i>
Верхний предел измеряемой величины	<i>H</i>
Нижний предел измеряемой величины	<i>L</i>
Дополнительное	
Первичный измерительный преобразователь, чувствительный элемент	<i>E</i>
Промежуточный измерительный преобразователь, передающий	<i>T</i>
измерительный преобразователь, дистанционная передача сигналов	
Станция управления	<i>K</i>
Преобразователь сигналов, вычислительное устройство	<i>Y</i>

приборов, в нижней - нумерацию (цифровую или буквенно-цифровую) позиций отдельных элементов контура измерения или регулирования.

Буквенные обозначения располагают в определенном порядке слева направо. Сначала дают обозначение основной измеряемой или регулируемой величины, затем, в случае необходимости --обозначение ее уточняющее и далее — обозначение функциональных признаков прибора. Последние также располагают в следующем порядке: *IRCSA*. Пример построения условного обозначения комплекта приборов для измерения, регистрации и автоматического регулирования перепада давления показан на рис. VII-1.

При построении условных обозначений приборов следует указывать лишь те функциональные признаки, которые используются в данной схеме. Например

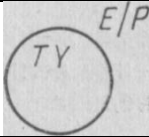
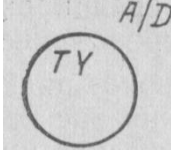
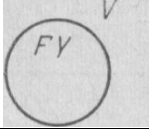


Рис. VII-1. Пример построения условного обозначения комплекта приборов для измерения, регистрации и автоматического регулирования перепада давления.

при обозначении показывающих и самопишущих приборов в случае, когда функция «показание» не используется, следует писать TR, а не TIR; PR, а не PIR и т. п.

При развернутом способе построения средств автоматизации используют также дополнительные условные обозначения, отражающие функциональные признаки приборов и применяемые для построения, преобразователей сигналов и вычислительных устройств (табл. VII.3).

Дополнительные условные обозначения преобразователей сигналов и вычислительных устройств, расшифровывающие вид преобразования или операции, выполняемые вычислительным устройством, наносятся справа от графического изображения прибора. Приведем пример обозначения:

Электропневматический преобразователь температуры	
Преобразователь аналогового сигнала в дискретный	
Вычислительное устройство, выполняющее операцию извлечения квадратного корня и т. п.	

Позиции регулирующих органов с исполнительными механизмами наносятся рядом с их изображением.

В обозначении каждого прибора, входящего в комплект данной схемы измерения или регулирования, первая буква всегда одна и та же. Она показывает измеряемую или регулируемую величину. Примеры построения условных обозначений приведены в Приложении 2.

При использовании условных обозначений необходимо руководствоваться следующими правилами.

Буква *A* применяется для обозначения функции сигнализации при упрощенном способе построения условных обозначений, а также при развернутом способе, когда для сигнализации используются лампы, встроенные в прибор. Во всех остальных случаях для обозначения контактного устройства прибора применяется буква *S* и при необходимости — символ ламп, гудка, звонка.

Сигнализируемые предельные значения измеряемых величин следует конкретизировать добавлением букв *H* (верхнее) и *L* (нижнее). Эти буквы наносят справа от графического обозначения.

Таблица VII.3. Дополнительные условные обозначения преобразователей сигналов и вычислительных устройств

Наименование	Обозначение
Род энергии сигнала:	
электрический	E
пневматический	P
гидравлический	G
Форма сигнала:	
аналоговый	A
дискретный	D
Операции, выполняемые вычислительным устройством:	
суммирование	Σ
умножение величины сигнала на постоянный коэффициент k	K
перемножение величин двух и более сигналов	X
деление величин друг на друга	$:$
возведение величины сигнала f в степень n	f^n
извлечение из величины сигнала корня степени n	$\sqrt[n]{}$
логарифмирование	$\lg$
дифференцирование	dx/dt
интегрирование	$\int$
изменение знака сигнала	$x(-1)$
ограничение верхнего значения сигнала	Max
ограничение нижнего значения сигнала	Min
Связь с вычислительным комплексом:	
передача сигнала на ЭВМ	B_i
вывод информации с ЭВМ	B_o

Букву S не следует применять для обозначения функции регулирования (в том числе позиционного).

Буква E применяется для обозначения чувствительных элементов, т. е. устройств, выполняющих первичное преобразование, например, термометров термоэлектрических (термопар), термометров сопротивления, сужающих устройств расходомеров.

Буква T обозначает промежуточное преобразование — дистанционную передачу сигнала. Ее рекомендуется применять для обозначения приборов с дистанционной передачей показаний, например, бесшкальных манометров (дифманометров), манометрических термометров с дистанционной передачей и других подобных приборов.

Буква K применяется для обозначения приборов, имеющих станцию управления, т. е. переключатель для выбора вида управления (автоматическое, ручное) и устройство для дистанционного управления.

Буква U рекомендуется для построения обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств.

Порядок построения условных обозначений с применением дополнительных букв следующий: на первом месте ставится буква, обозначающая измеряемую величину; на втором — одна

из дополнительных букв: *E*, *T*, *K* или *У*. Приведем несколько примеров:

Первичные измерительные преобразователи температуры (термометры термоэлектрические, термометры сопротивления и др.).....*TE*

Первичные измерительные преобразователи расхода (сужающие устройства расходомеров, датчики индукционных расходомеров и др.).....*FE*

Бесшкальные манометры с дистанционной передачей показаний.....*PT*

Бесшкальные расходомеры с дистанционной передачей *FT*

Буква *U* может быть использована для обозначения прибора, измеряющего несколько разнородных величин. Расшифровка этих величин приводится около прибора или на поле чертежа. Для конкретизации измеряемой величины около изображения прибора (справа от него) необходимо указывать наименование или символ измеряемой величины, например «Напряжение», «Ток», рН, О₂ и т. д.

Для обозначения величин, не предусмотренных данным стандартом, могут быть использованы резервные буквы *B*, *N*, *O*; при этом многократно применяемые величины следует обозначать одной и той же резервной буквой. Резервные буквенные обозначения должны быть расшифрованы на схеме. В одной и той же документации не допускается применение одной резервной буквы для обозначения разных величин.

В обозначении устройств, предназначенных для ручных операций, на первом месте должна стоять буква *H*, например:

Переключатели электрических цепей измерения (управления), переключатели газовых (воздушных) линий *HS*

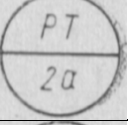
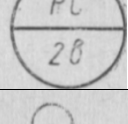
Байпасные панели дистанционного управления . . . *HS*

Кнопки (ключи) для дистанционного управления, задатчики *H*

При одновременном измерении разнородных величин измерительные преобразователи обозначают в соответствии с измеряемой величиной, а вторичный регистрирующий прибор — *UR*.

На технологическом листе проекта при упрощенном и развернутом способах построения каждой схеме контроля и регулирования присваивается порядковый номер (арабские цифры), начиная слева (с номера 1 и далее), который записывается в нижней части графического изображения измерительного или регулирующего комплекта прибора или отдельных его элементов. В свою очередь при развернутом способе построения каждому элементу схемы контроля и регулирования дополнительно присваивается цифровой или буквенный индекс по алфавиту в направлении прохождения контролируемого или регулируемого сигнала от воспринимающего элемента до вторичного прибора или исполнительного устройства.

Приведем несколько примеров условных обозначений отдельных элементов схем:

При измерении расхода вещества методом переменного перепада давления		
сужающее устройство		
дифманометр с дистанционной передачей		
вторичный прибор		
При регулировании давления		
манометр с дистанционной передачей		
вторичный прибор со станцией управления		
автоматический регулятор		
исполнительный механизм		

Щиты и пульты управления на функциональных схемах условно изображают в виде прямоугольников произвольных размеров, достаточных для нанесения графических условных обозначений устанавливаемых на них приборов, средств автоматизации, аппаратуры управления и сигнализации по ГОСТ. Комплектные устройства (машины централизованного контроля, управляющие машины, полуккомплекты телемеханики и др.) обозначаются на функциональных схемах также в виде прямоугольника произвольных размеров с указанием типа устройства внутри прямоугольника.

Функциональные связи между технологическим оборудованием и установленными на нем первичными преобразователями, а также со средствами автоматизации, установленными на щитах и пультах, показываются на схемах тонкими сплошными линиями. При этом каждая связь изображается одной линией независимо от фактического числа проводов или труб, осуществляющих эту связь. Входные и выходные сигналы линий связи допускается подводить к условным обозначениям приборов и средств автоматизации с любой стороны — сверху, снизу, сбоку. На линиях связи допускается наносить стрелки, указывающие направления передачи сигнала. Линии связи следует наносить на чертежи по кратчайшему расстоянию и проводить с минимальным числом изгибов и пересечений. При этом

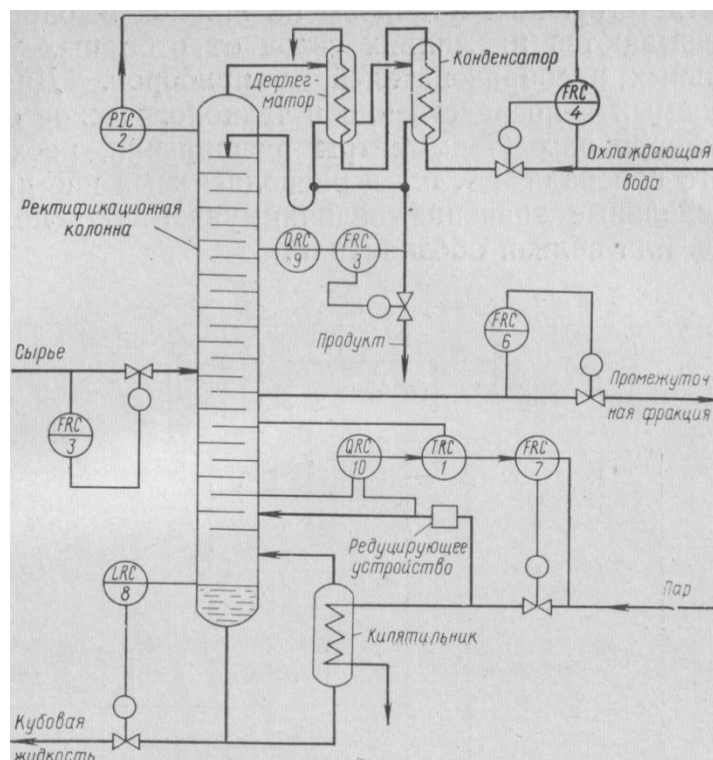


Рис. VII-2. Пример изображения схемы контроля и автоматизации на технологической схеме упрощенным способом.

допускается пересечение линиями связи изображений технологического оборудования и коммуникаций. Пересечение линиями связи условных обозначений приборов и средств автоматизации не допускается.

В больших и сложных системах автоматизации, когда вычерчивание непрерывных линий связи ведет к сложным их переплетениям, затрудняющим чтение чертежа, можно разрывать линии связи. При этом для удобства чтения схемы оба конца линий связи в местах разрыва нумеруют одной и той же арабской цифрой. Номера линий связи располагают в горизонтальных рядах. В нижнем ряду (со стороны щитовых приборов) номера должны следовать в возрастающем порядке, в верхних рядах — располагаются произвольно.

Для тех участков схемы, где нанесение непрерывных линий затруднительно, допускается комбинированное изображение линий связи: непрерывными линиями и адресным методом.

Для облегчения понимания сущности автоматизируемого объекта, возможности выбора пределов измерения, шкал приборов и размещения регуляторов на функциональных схемах указывают предельные рабочие (максимальные или минимальные) значения измеряемых или регулируемых величин, при установившихся режимах работы. Эти значения в единицах измерения,

соответствующих надписям на шкалах выбираемых приборов, указываются на линиях связи от отборных устройств измерительных преобразователей до приборов. Для приборов, встраиваемых непосредственно в технологическое оборудование или трубопроводы (термометры расширения, расходомеры постоянного перепада и т. п.) и располагаемых вне прямоугольников, предельные значения величин указывают под позициями приборов или вблизи обозначений.

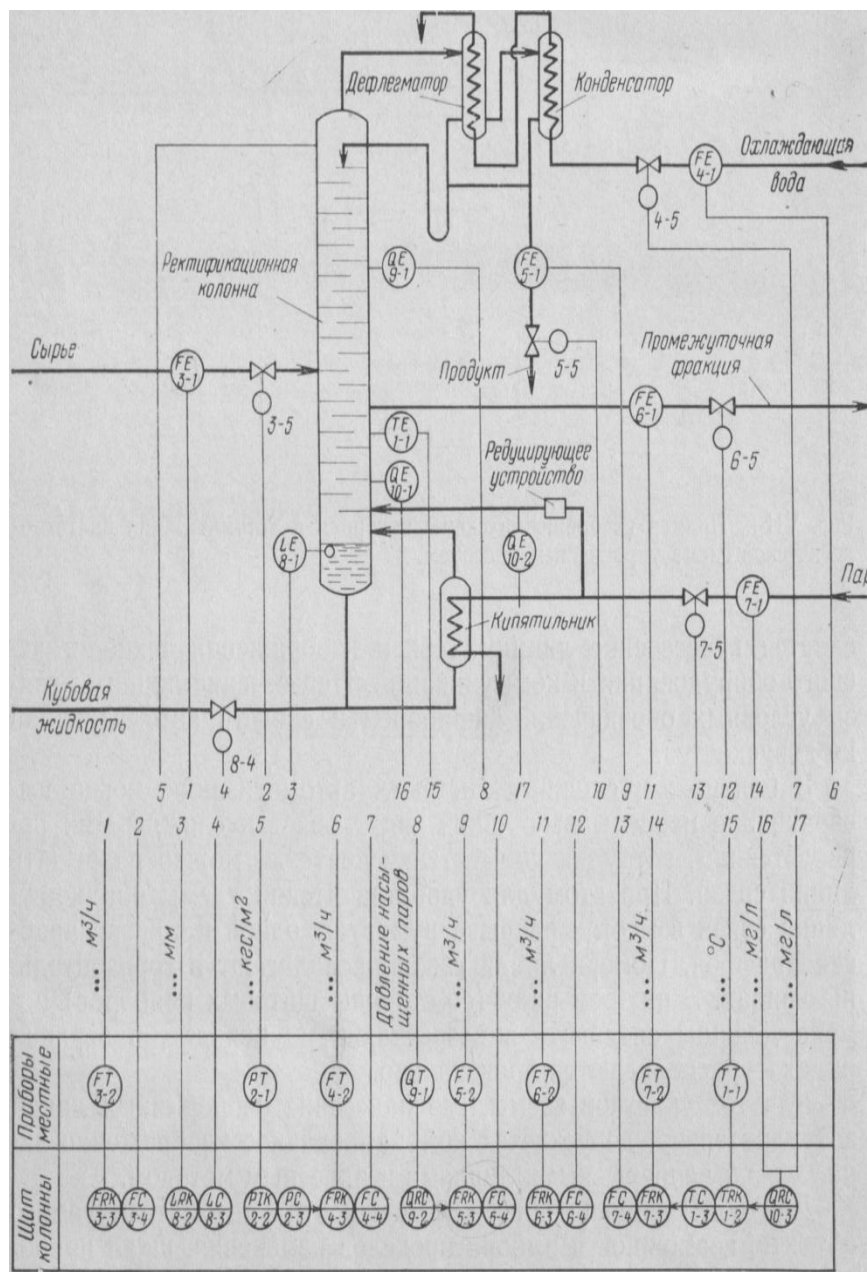


Рис. VII-3. Пример изображения функциональной схемы автоматизации процесса ректификации развернутым способом.

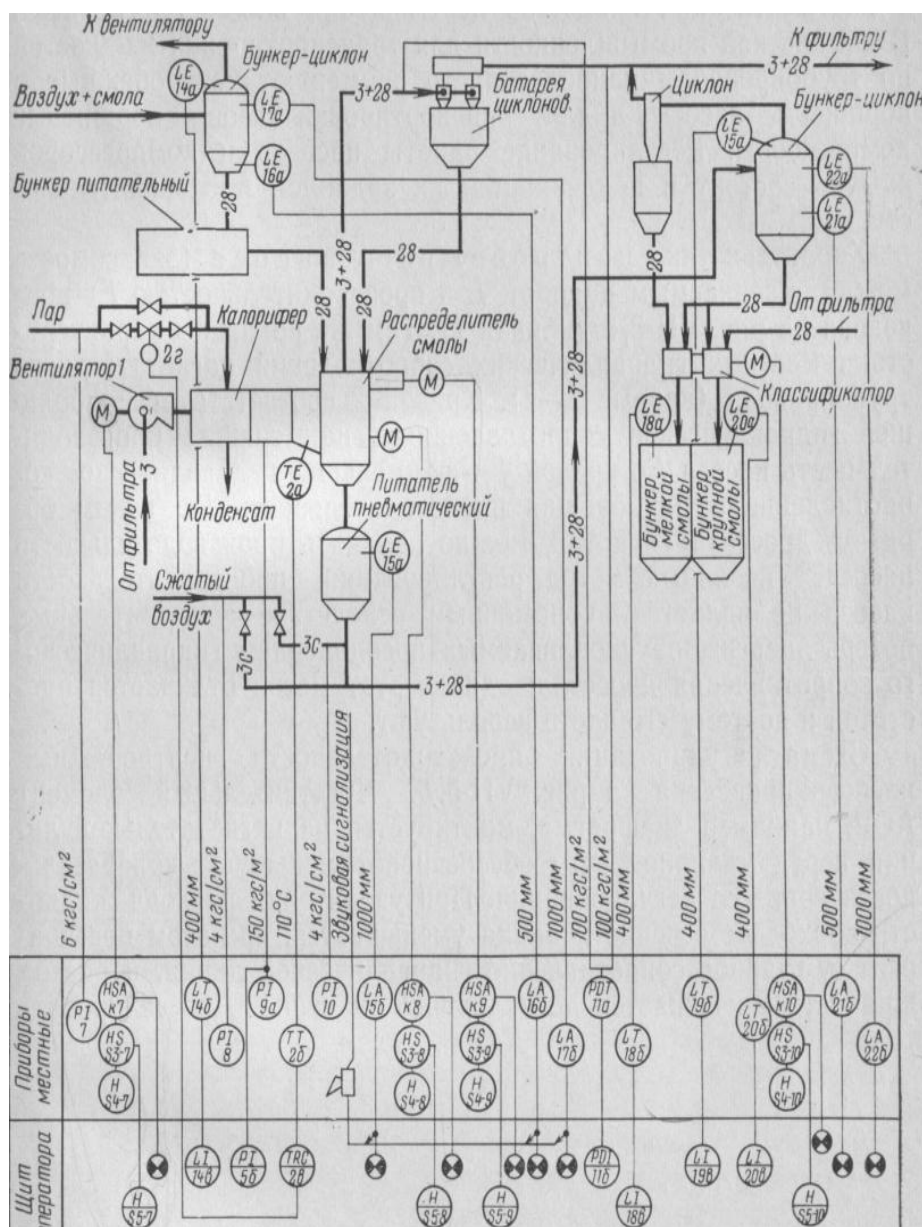


Рис. VII-4. Пример изображения функциональной схемы автоматизации процесса сушки и классификации развернутым способом.

Пример изображения систем контроля и автоматизации на технологической схеме упрощенным способом показан на рис. VIII-2. Примеры изображения функциональных схем автоматизации развернутым способом даны на рис. VII-3 и рис. VII-4.

2. Автоматизация гидромеханических процессов

К гидромеханическим относят процессы перемещения жидкостей и газов, а также разделения и очистки неоднородных систем.

Автоматизация процессов перемещения жидкостей и газов.

В химической промышленности для транспортировки жидкостей по трубопроводам наиболее часто применяют центробежные и поршневые насосы, а для транспортировки газов — поршневые компрессоры. Регулирование работы насосов и компрессоров обычно состоит в поддержании их заданной производительности.

Характеристика центробежного насоса (зависимость между развиваемым напором L и производительностью F) приведена на рис. VII-5, а (кривая 1). Там же показаны характеристики местных гидравлических сопротивлений нагнетательного трубопровода (кривые 2—4). Кривой 2 соответствует наибольшее гидравлическое сопротивление и наименьшая производительность насоса F_1 , кривой 4 — наименьшее гидравлическое сопротивление и наибольшая производительность F_3 . Таким образом, дросселируя поток, можно изменять производительность насоса. Указанный метод регулирования производительности насоса не является экономичным вследствие дополнительных потерь энергии, обусловливаемых преодолением гидравлического сопротивления дросселя; однако этот метод отличается простотой и поэтому его часто используют.

Схема регулирования производительности центробежных насосов приведена на рис. VII-5, б. Чувствительный элемент АСР, например диафрагма, монтируется на нагнетательной линии перед клапаном, что обеспечивает меньшую колебательность процесса регулирования. При увеличении расхода жидкости проходное сечение клапана уменьшается, при этом повышается суммарное сопротивление гидравлической линии, и расход жидкости уменьшается до заданного значения. Дросселировать

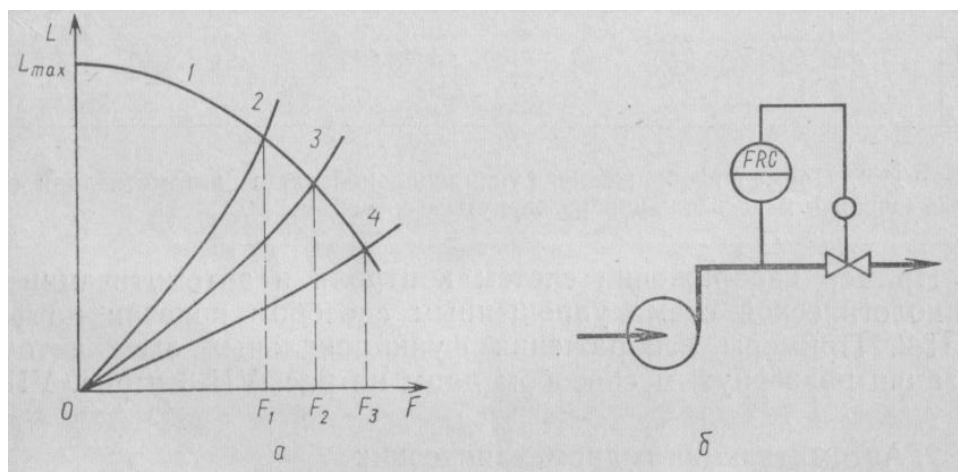


Рис. VII-5. Характеристика работы (а) и схема регулирования производительности (б) центробежных насосов:

1 — характеристика насоса; 2—4 — характеристики трубопровода.

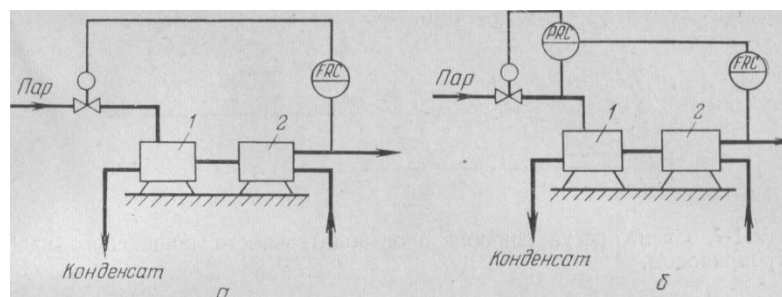


Рис. VII-6. Схемы стабилизации (а) и каскадного регулирования (б) производительности поршневых насосов с паровым приводом: 1 — паровая машина; 2 — поршневой насос

линию всасывания центробежных насосов не рекомендуется, так как это вызывает кавитацию, которая приводит к быстрому разрушению насоса, а также к резкому понижению производительности и напора насоса. В общем случае, клапан, установленный на нагнетательной линии насоса, может работать и от регуляторов других величин, что определяется требованиями технологии.

В случае применения объемных поршневых насосов давление, обуславливающее перемещение жидкости, создается при ее периодическом вытеснении из замкнутого объема возвратно-поступательно движущимся поршнем. Производительность поршневого насоса практически постоянна и не зависит от напора. Поршневые насосы приводятся в действие паровыми машинами или электродвигателями.

Производительность поршневого насоса с паровым приводом регулируется изменением подачи пара в цилиндр привода. Для этого на паропроводе (рис. VII-6) устанавливают клапан, при открытии проходного сечения которого к приводу насоса будет подаваться различное количество пара, определяющее число ходов поршня насоса и тем самым его производительность. Управляющее воздействие на клапан подают от регулятора расхода, а чувствительный элемент системы устанавливают на нагнетательной линии насоса (рис. VII-6, а). По сравнению с дросселированием это более рациональный метод. При часто и резко изменяющемся давлении пара применяют каскадную систему регулирования давления пара с корректировкой по расходу нагнетаемого продукта (рис. VII-6, б).

Регулирование производительности поршневых насосов с приводом от электродвигателя осуществляют путем перепуска части жидкости с нагнетательной линии на всасывающую (рис. VII-7). Таким же образом регулируют производительность шестеренчатых и лопастных насосов.

Производительность центробежных компрессоров (газодувок) стабилизируется системами с клапаном, установленным на всасывающей линии (рис. VII-8). Такие компрессоры

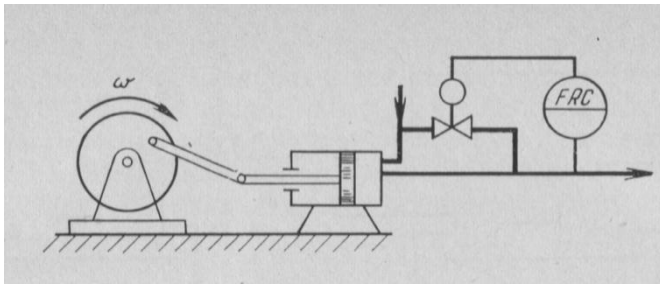


Рис. VII-7. Схема регулирования производительности поршневого насоса с электроприводом.

неустойчиво работают в области помпажа, характеризующейся наличием больших давлений и малых расходов: при работе в этой области уменьшение потребления газа приводит к кратковременному изменению направления потока газа. При этом возникают большие колебания давления газа, которые могут вызвать поломку компрессора. Однако коэффициент полезного действия компрессора имеет наибольшее значение вблизи области помпажа. Для обеспечения работы компрессора в этих условиях необходимо иметь противопомпажную автоматическую защиту.

В качестве такой защиты может использоваться система сброса части сжатого газа в ресивер при уменьшении его расхода в линии к потребителю (см. рис. VII-8). При приближении к области помпажа регулятор расхода откроет клапан, установленный на линии к ресиверу. Это обусловит увеличение производительности компрессора, снижение давления в нагнетательной линии и повышение давления во всасывающей линии, что предотвратит помпаж компрессора.

Регулирование производительности поршневых компрессоров, развивающих большие давления, обычно осуществляют методом перепуска части газа с нагнетательной линии во всасывающую по байпасному трубопроводу. Работа такой системы регулирования в значительной степени облегчается меньшей пульсацией давления, вследствие сжимаемости газов.

Автоматизация разделения и очистки неоднородных систем. Разделение жидких систем в химической промышленности проводят в отстойниках, фильтрах и центрифугах, а очистку газовых систем — в циклонах, фильтрах, скрубберах, электрофильтрах.

Регулирование отстойников заключается в поддержании на минимально возможном значении концентрации твердой фазы в осветленной жидкости при изменении расхода исходной суспензии и концентрации твердой фазы (ценного продукта) в суспензии. Для этого подбирают диаметр отстойника, чтобы время нахождения жидкой фазы в аппарате превышало время, необходимое для оседания твердых частиц в бункере. Осветленная жидкость выводится из отстойника благодаря переливу, а граница раздела зон осаждения и уплотнения поддерживается на

постоянной высоте регулятором уровня, воздействующим на расход сгущенной суспензии.

Для фильтрации жидких неоднородных систем с большой производительностью применяют барабанные, дисковые, карусельные и ленточные вакуум-фильтры. Регулирование процесса фильтрования имеет своей задачей получение минимально возможной влажности осадка при изменении концентрации и расхода суспензии, вязкости жидкой фазы, дисперсного состава твердых частиц. При использовании, например, барабанных фильтров обычно регулируют уровень суспензии в ванне, изменяя поступление исходной суспензии. Осадок снимается с барабана ножом. В случае необходимости толщина осадка регулируется путем изменения степени вакуумирования или скорости вращения барабана.

Центрифугирование жидких систем осуществляют в разнообразных по конструкции отстойных или фильтрующих центрифугах. На этот процесс воздействуют те же основные возмущения, что и на процесс фильтрации; цели регулирования также одинаковы. Для достижения минимально возможной влажности осадка применяют центрифуги с высокой разделяющей способностью, обеспечивающей требуемое качество разделения при значительных колебаниях возмущений. При центрифугировании регулированию в основном подлежит расход исходной суспензии, что обеспечивает постоянную производительность аппарата. Фугат и осадок отводятся путем свободного удаления.

Очистку газов от частиц пыли размером более 10 мкм проводят в циклонах. Циклоны чувствительны к колебаниям нагрузки по газу и рассчитываются на определенную производительность по газу с допустимым содержанием в нем пыли. Если технологические условия позволяют, то нагрузку циклонов по газу стабилизируют.

Процесс фильтрования газовых систем в фильтрах заключается в прохождении запыленного газа через пористые перегородки, задерживающие на своей поверхности твердые частицы. Регулирование такого процесса заключается в поддержании на минимально возможном значении концентрации частиц твердого вещества в газе на выходе из фильтра.

Регенерация фильтрующих поверхностей, например в рукавных фильтрах, производится сжатым воздухом, периодически

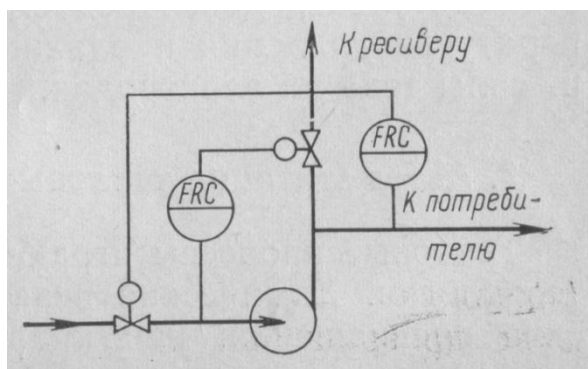


Рис VII-8. Схема регулирования производительности центробежного компрессора (газодувки) с противополопальной защитой.

подаваемым через сопла в рукава с целью деформации фильтрующей ткани, приводящей к тому, что пыль с нее сбивается. Для этого регулируют перепад давления на фильтре. При достижении максимального значения позиционный регулятор выдает сигнал на продувку фильтра сжатым воздухом. Фильтр продувают до тех пор, пока перепад давления не снизится до минимального значения. Воздух на продувку должен поступать с давлением, значение которого устанавливается отдельным регулятором. В связи с трудностью измерения перепада давления на фильтре (засорение импульсных трубок пылью) регенерацию фильтрующих поверхностей проводят также по заранее заданной временной программе, в которой устанавливается определенная длительность периодов фильтрации и регенерации. Такая программа реализуется с помощью командного прибора.

Для тонкой очистки газов от пыли применяют мокрую очистку — промывку газов жидкостью в полых и насадочных скрубберах, скрубберах Вентури и других аппаратах. Процесс целесообразен, когда допустимо увлажнение и охлаждение очищаемого газа, а отделяемые твердые частицы не являются целевым продуктом.

Регулирование скруббера Вентури заключается в поддержании постоянства перепада давления на нем посредством изменения поперечного сечения горловины. Это обеспечивает постоянную скорость газа в самом узком сечении скруббера и определенную степень дисперсности распыления жидкости. Необходимое количество жидкости подается к форсунке отдельным регулятором давления. Контролю подлежат расходы газа и жидкости.

Электрическая очистка газов основана на образовании под действием электрического разряда положительных и отрицательных ионов газа и свободных электронов. Сталкиваясь с твердыми частицами, ионы и электроны отдают им свой заряд и увлекают к осадительному электроду.

Концентрация пыли на выходе электрофильтра зависит от концентрации пыли во входном потоке, нагрузки, температуры, давления, влажности газа и размера твердых частиц. Заданной степени очистки газа достигают путем поддержания оптимального числа искровых зарядов, предшествующих пробой. Оптимальное значение определяется свойствами запыленного газа, а также конструктивными и электрическими характеристиками электродов. Предусматривается контроль расхода, температуры, давления и влажности газового потока, напряжения и силы тока на электродах.

3. Автоматизация тепловых процессов

Тепловые процессы играют значительную роль в химической технологии. Химические реакции веществ, а также их физические превращения, как правило, сопровождаются тепловыми

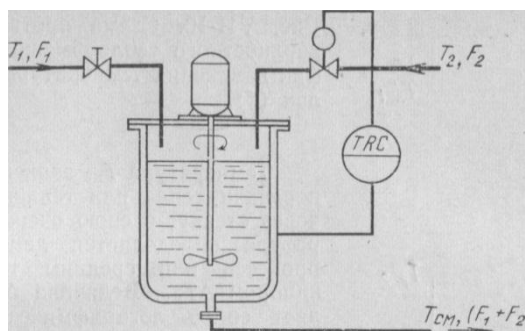


Рис. VII-9. Схема регулирования теплообменника смешения.

явлениями. Тепловые эффекты часто составляют основу технологических процессов. В связи с этим, вопросы автоматизации теплообменников, трубчатых печей, выпарных аппаратов и других объектов химической технологии, связанных с передачей тепла, играют существенную роль.

Автоматизация теплообменников. Передачу тепла от горячих теплоносителей к более холодным осуществляют в теплообменниках. Различают теплообменники непосредственного смешения теплоносителей и поверхностные теплообменники, в которых тепло передается через глухую разделительную стенку. В последних теплопередача может протекать без изменения агрегатного состояния теплоносителей (нагреватели, холодильники) и с изменением агрегатного состояния (испарители, конденсаторы). Нагревание продуктов проводят также в трубчатых печах топочными газами.

Регулирование теплообменников смешения заключается в поддержании постоянства температуры $T_{см}$ суммарного потока на выходе. Входными величинами теплообменника являются расходы жидкостей на входе (F_1 и F_2) и их температуры (T_1 и T_2). Если $T_2 > T_{см} > T_1$ а также если удельные теплоемкости и плотности жидкостей обоих потоков одинаковы, то зависимость $T_{см}$ от входных величин находится из уравнения теплового баланса (потери пренебрегаем):

$$T_{см} = T_1 + \frac{F_2}{F_1 + F_2} (T_2 - T_1) \quad (\text{VII, 1})$$

Температуру $T_{см}$ обычно стабилизируют посредством изменения расхода одного из входных потоков. Схема регулирования теплообменника смешения показана на рис. VII-9. Теплообменники смешения обладают малым запаздыванием и значительным самовыравниванием.

Регулирование поверхностных теплообменников, заключается в поддержании постоянства температуры одного из теплоносителей на выходе из теплообменника, например, температуры $T_{х2}$ (рис. VII-10).

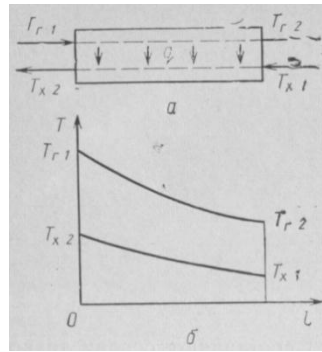


Рис. VII-10. Схема противоточного поверхностного теплообменника (а) и график изменения температуры теплоносителей (б).

Температура T_{x2} зависит от скорости передачи тепла или теплового потока q через стенку; в свою очередь эта температура определяется движущей силой процесса или средним температурным напором ΔT_{cp} . Величина ΔT_{cp} представляет собой логарифмическую разность температур (обозначения см. на рис. VII-10).

$$\Delta T_{cp} = \frac{(T_{r1} - T_{x2}) - (T_{r2} - T_{x1})}{\ln \frac{T_{r1} - T_{x2}}{T_{r2} - T_{x1}}} \quad (\text{VII, 2})$$

Величина ΔT_{cp} зависит от значений температур теплоносителей на входе и выходе теплообменника и, в частности, от температуры T_{x2} . С возрастанием T_{x2} движущая сила процесса уменьшается, и наоборот. Это свидетельствует о том, что поверхностные теплообменники обладают свойством самовыравнивания.

Если отношение $(T_{r1} - T_{x2}) / (T_{r2} - T_{x1}) < 4$ то движущую силу процесса при инженерных расчетах можно определять по среднеарифметической разности температур

$$\Delta T_{cp} = \frac{(T_{r1} - T_{x2}) + (T_{r2} - T_{x1})}{2} \quad (\text{VII, 3})$$

Погрешность такой замены не превышает 10%. Основное уравнение теплообменника

$$q = KA \Delta T_{cp}$$

в этом случае принимает вид

$$q = KA \frac{(T_{r1} - T_{x2}) + (T_{r2} - T_{x1})}{2} \quad (\text{VII, 4})$$

где K — коэффициент теплопередачи стенки; A — поверхность теплообмена.

Установим зависимость между температурой холодного теплоносителя на выходе T_{x2} и массовыми расходами теплоносителей $F_{mг}$ и $F_{mх}$ в случае, когда обменивающиеся теплом жидкости не изменяют своего агрегатного состояния.

Тепловой поток q через стенку выразим двумя следующими балансовыми уравнениями:

$$q = c_r F_{mг} (T_{r2} - T_{r1}) \quad (\text{VII, 5})$$

$$q = c_x F_{mх} (T_{x2} - T_{x1}) \quad (\text{VII, 6})$$

где c_r и c_x — удельные теплоемкости теплоносителей; $F_{mг}$ и $F_{mх}$ — их массовые расходы.

Из этих уравнений найдем температуры T_{x2} и T_{r2} и подставим в уравнение (VII,4)

$$q = \frac{KA}{2} \left\{ T_{r1} - \left[T_{x1} + \frac{q}{c_x F_{mх}} \right] + \left[T_{r1} - \frac{q}{c_r F_{mг}} \right] - T_{x1} \right\}$$

Из последнего равенства определим тепловой поток

$$q = \frac{T_{r1} - T_{x1}}{\frac{1}{KA} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c_x F_{mх}} + \frac{1}{c_r F_{mг}} \right)} \quad (\text{VII, 7})$$

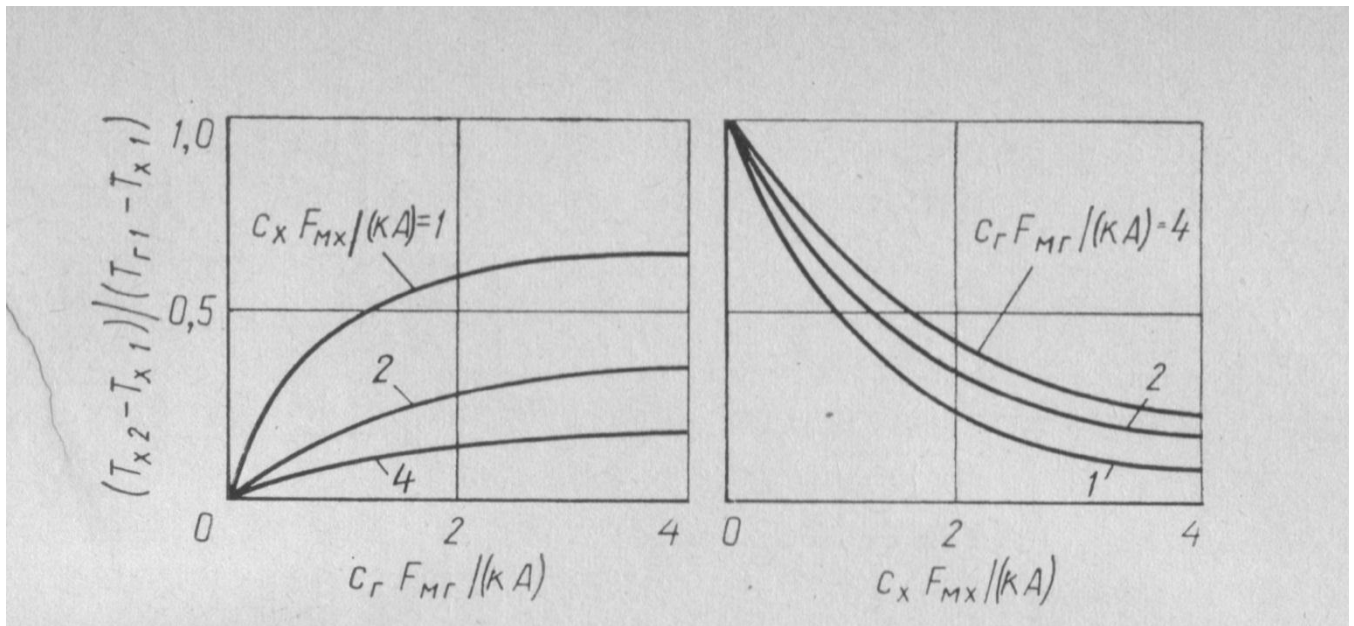


Рис. VII-11. Зависимость температуры на выходе из теплообменника от массовых расходов холодного (х) и горячего (г) теплоносителей

Разделив равенство (VII, 6) на (VII, 7), получим зависимость искомой относительной температуры от других величин процесса

$$\frac{T_{x2} - T_{x1}}{T_{r1} - T_{x1}} = \frac{1}{\frac{c_x F_{mx}}{KA} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{c_x F_{mx}}{c_r F_{mr}} \right)} \quad (\text{VII, 8})$$

Полученная зависимость в виде семейства кривых приведена на рис. VII-11, где показано влияние массовых расходов теплоносителей на температуру T_{x2} .

Из этих зависимостей следует, что температура T_{x2} зависит от расходов F_{mx} и F_{mr} . Поскольку поток нагреваемого продукта представляет собой нагрузку объекта, для поддержания постоянства температуры T_{x2} может быть рекомендована схема регулирования, приведенная на рис. VII-12, а, по которой температуру продукта на выходе из теплообменника регулируют путем воздействия на расход другого теплоносителя F_{mr} . Однако из зависимостей, приведенных на рис. VII-11 следует, что температура T_{x2} более чувствительна к нагрузке холодного теплоносителя, чем к расходу горячего теплоносителя. В связи с этим затрудняется качественное регулирование теплообменников в широком интервале изменения расходов теплоносителей и требуются регуляторы с дифференциальной составляющей.

Если по условиям технологии не допускается изменение потоков теплоносителей, то температуру продукта на выходе из теплообменника регулируют путем байпасирования части продукта и изменения его расхода. При этом регулирующий клапан устанавливают на байпасной линии (рис. VII-12,б). Такие схемы применяют, например, при использовании тепла горячих промежуточных или конечных продуктов для нагрева исходного сырья. Отметим, что байпасирование одного из теплоносителей требует некоторого увеличения поверхности теплообмена и большего расхода греющего агента (для переохладения или перегрева продукта) чем при дросселировании. Однако при этом улучшаются динамические характеристики системы регулирования, вследствие исключения теплообменника из контура регулирования и уменьшения времени запаздывания объекта.

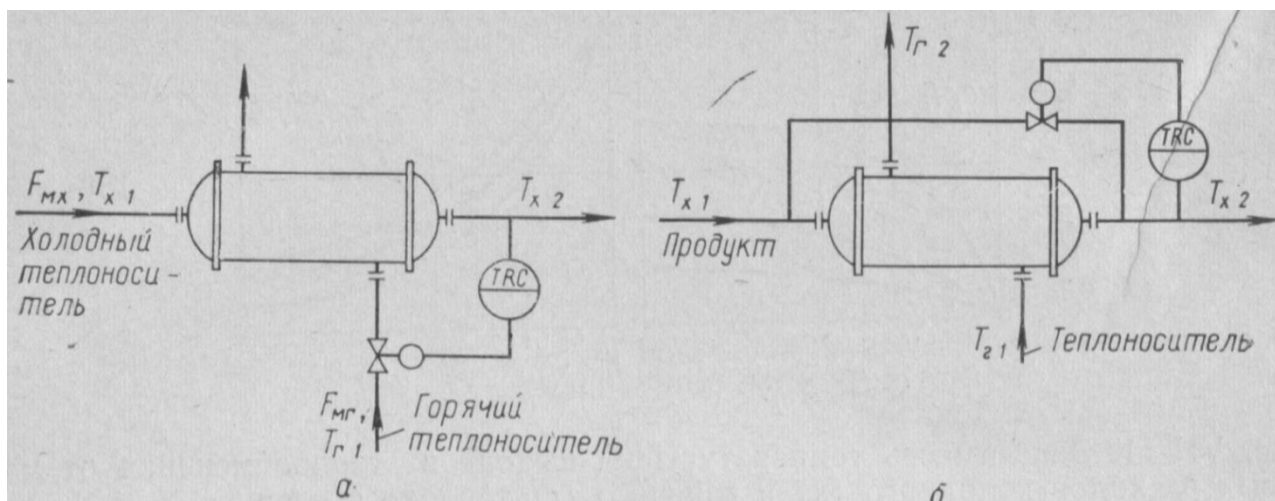


Рис. VII-12. Схема регулирования поверхностных теплообменников воздействием на расход горячего теплоносителя (а) и байпасированием холодного теплоносителя (б).

При изменении агрегатного состояния теплоносителей их температура в теплообменнике практически не изменяется и скорость теплопередачи q можно определить по равенству:

$$q = rF_M \quad (\text{VII, 9})$$

где r — теплота фазового перехода; F_M — массовый расход среды.

Если в качестве греющего агента применяют водяной пар, то температуру технологического продукта обычно регулируют путем изменения подачи пара (рис. VII-13, а). При значительных колебаниях давления пара применяют каскадную систему регулирования давления пара с коррективкой по температуре нагретого продукта.

Возможно также регулирование скорости теплопередачи путем поддержания постоянства температуры продукта на выходе из теплообменника клапаном, установленным на линии отвода конденсата (рис. VII-13, б). Это приводит к частичному заполнению теплообменника конденсатом, что в свою очередь

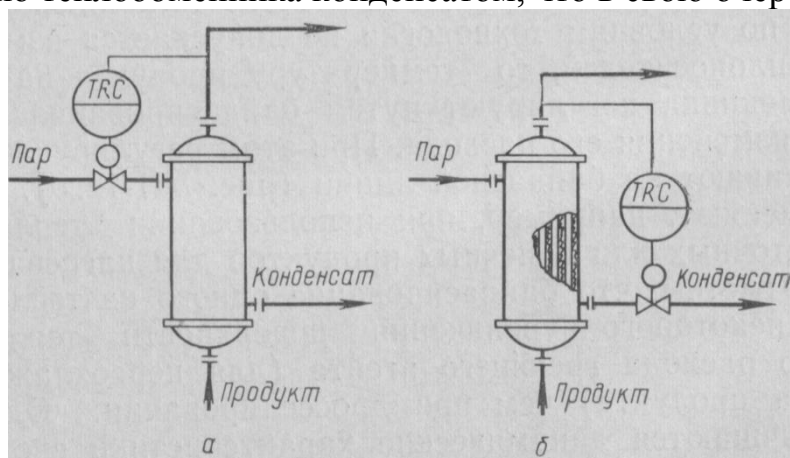


Рис. VII-13. Схемы регулирования работы теплообменников путем воздействия на расход греющего пара (а) и конденсата (б).

скажется на суммарной величине коэффициента передачи теплообменника, а следовательно, и скорости теплопередачи. Такая система реагирует более медленно, чем система с клапаном установленным на линии подачи греющего пара; ее применение рекомендуется только при отсутствии резких возмущений по нагрузке. Но вместе с тем, она позволяет лучше использовать тепло водяного пара, так как значения его давления и температуры более высоки, вследствие отсутствия дополнительных гидравлических сопротивлений на паропроводе, а отводимый конденсат принимает температуру несколько меньшую, чем температура конденсации пара. Это позволяет повысить эффективность работы теплообменника на 5—7%. Кроме того, *по* размерам клапан, установленный на линии отвода конденсата будет меньше того, который установлен на линии подачи греющего пара.

Процесс конденсации технологического продукта может быть охарактеризован температурой конденсата этого продукта при постоянном давлении или давлением пара продукта. Непосредственное регулирование этих величин с воздействием на расход пара, являющийся нагрузкой конденсатора, не представляется возможным.

В этом случае наиболее широко применяют схемы, предусматривающие поддержание постоянства давления паров технологического продукта (рис. VII-14) с воздействием на расход хладагента или конденсата, так как контуры регулирования давления достаточно динамичны. Регулирование уровня путем отвода конденсата (рис. VII-14, *а*) обеспечивает соблюдение материального баланса конденсатора. По расходу хладагента можно судить о тепловой нагрузке объекта. Изменение расхода конденсата продукта (рис. VII-14, *б*) обуславливает изменение теплообменной поверхности, благодаря частичному заполнению конденсатора жидкостью. Последнее, вследствие того, что при конденсации коэффициенты передачи паров значительно выше, чем при охлаждении конденсата, приводит к изменению скорости

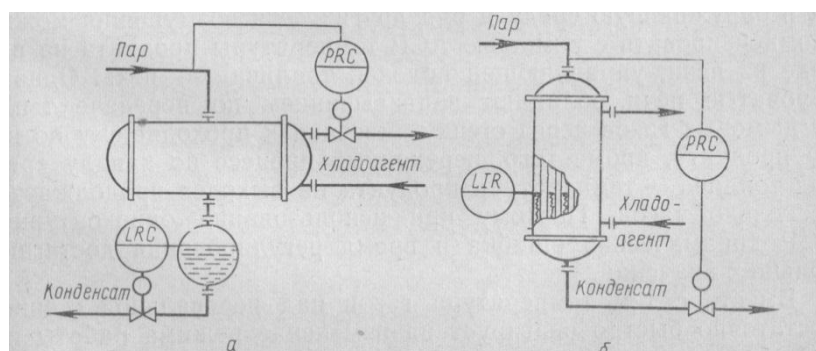


Рис. VII-14. Схемы регулирования работы конденсаторов путем воздействия на расходы хладагента (*а*) и конденсата (*б*).

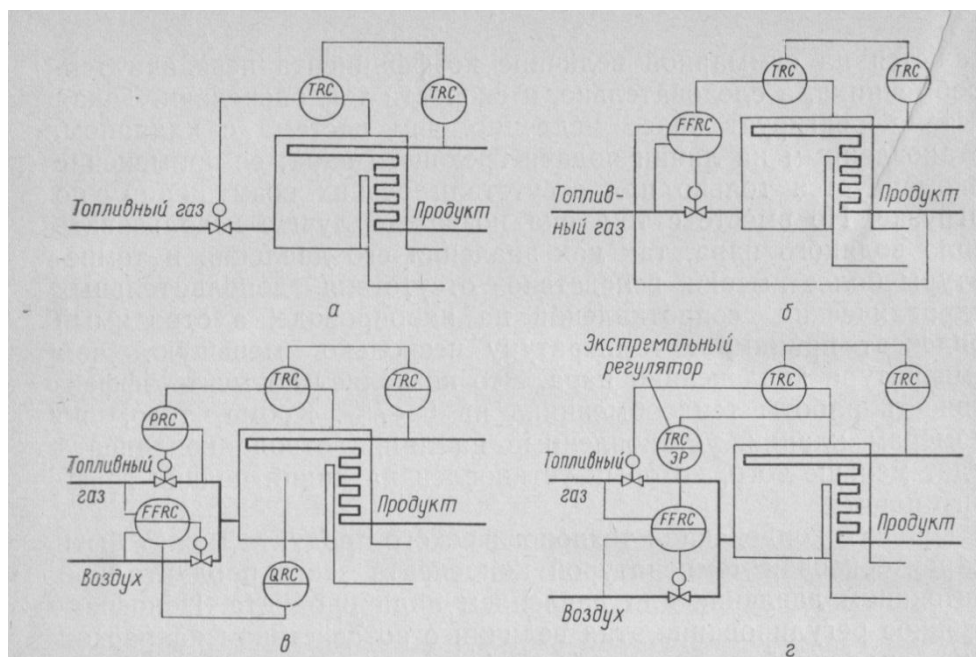


Рис. VII-15. Схемы автоматизации трубчатых печей:

- а* — каскадная; *б* — каскадная с регулятором соотношения «топливный газ — продукт»;
- в* — с коррекцией по содержанию кислорода в топочных газах;
- г* — с экстремальным регулятором, корректирующим соотношение «топливный газ — воздух».

теплопередачи. Тепловую нагрузку объекта определяют по текущему значению уровня конденсата.

Автоматизация трубчатых печей. Прокачиваемый через змеевик трубчатой печи продукт нагревается за счет тепла, образующегося при сжигании топливного газа.

Цель регулирования трубчатых печей — поддержание постоянства температуры продукта на выходе из печи. Возмущениями объекта являются расход и температура исходного продукта, теплотворная способность топлива, количество и температура воздуха, подаваемого для сжигания топлива, потери тепла в окружающую среду и ряд других. Эти возмущения можно скомпенсировать с помощью АСР температуры продукта на выходе из печи, управляющей подачей топлива в печь. Однако трубчатые печи обладают запаздыванием по передаче тепла от дымовых газов через стенку змеевика к проходящему по нему продукту, кроме того, переходный процесс по каналу «расход топлива — температура продукта на выходе» продолжается несколько часов. Поэтому при использовании одноконтурной АСР динамическая ошибка и время регулирования достигают больших значений.

Вместе с тем температура газов над перевальной стенкой достаточно быстро реагирует на изменение режима работы печи, обусловленное изменением количества топливного газа, подаваемого на сжигание. Поэтому существенное улучшение

качества регулирования температуры продукта на выходе из печи может быть достигнуто применением системы каскадного регулирования (рис. VII-15,а), состоящей из регулятора температуры продукта на выходе из печи (корректирующий регулятор), воздействующего на задание регулятора температуры газов над перевальной стенкой (стабилизирующий регулятор), который управляет подачей топлива в печь. Стабилизирующий регулятор начинает компенсировать возникающие возмущения, влияющие на процесс сгорания топлива, прежде чем они приведут к изменению температуры продукта.

При резком изменении нагрузки печи по расходу нагреваемого продукта и при наличии возмущения по расходу топлива используют также вышеописанную систему каскадного регулирования, стабилизирующий регулятор которой воздействует на регулятор соотношения расходов продукта и топлива. В этом случае регулятор соотношения управляет подачей топлива в печь (рис. VII-15,б).

При принудительной подаче первичного воздуха (рис. VII-15, в) оптимальный его расход, при котором температура в топке принимает максимальное значение, поддерживают посредством регулятора соотношения «топливный газ — воздух», обеспечивающего заданное значение коэффициента избытка воздуха, определяющего интенсивность процесса сгорания. Если при этом теплотворная способность топлива существенно изменяется, то на регулятор соотношения направляют корректирующий сигнал от регулятора стабилизации содержания кислорода в топочных газах. Это обеспечивает полное сгорание топлива и; высокое качество регулирования.

Сильным возмущением режима работы трубчатых печей со стороны топливного газа является изменение его давления. Это изменение компенсируют введением в АСР температуры продукта на выходе из печи дополнительного регулятора давления, задание на который подают от регулятора температуры в топочном пространстве. Такие системы обеспечивают качественное регулирование расхода топливного газа, так как расход газа в большой степени зависит от его давления (см. рис. VII-15,г).

Так как зависимость температуры в топке от соотношения «топливо — воздух» имеет экстремальный характер, при автоматизации трубчатых печей применяют системы экстремального регулирования. На рис. VII-15, з экстремальный регулятор отыскивает максимальное значение температуры дымовых газов над перевальной стенкой, воздействуя на регулятор соотношения «топливный газ — воздух», управляющий подачей первичного воздуха.

При регулировании соотношения «топливный газ — воздух» необходимо обеспечить меры безопасности так как при недостатке воздуха в топке может образоваться взрывоопасная смесь. Следует предусмотреть ограничение расхода топлива так, чтобы этот расход никогда не превышал максимально допустимого

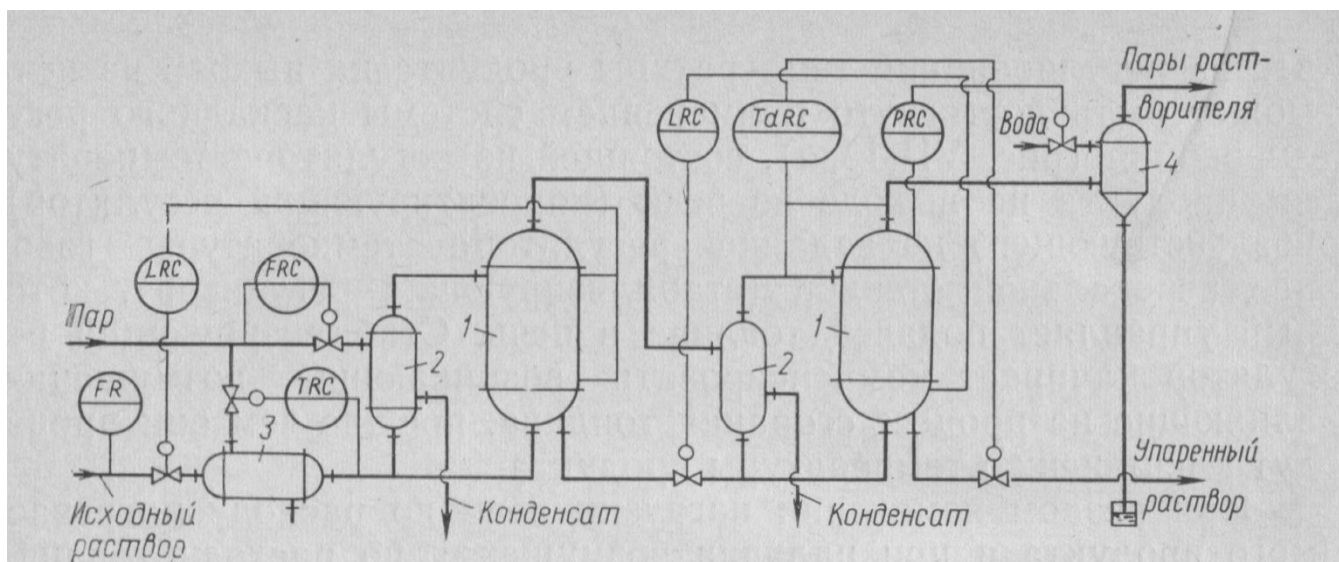


Рис. VII-16. Схема стабилизации технологических величин выпарной установки:

J — выпарной аппарат; 2 — кипяtilьник; 3 — теплообменник; 4 — барометрический конденсатор.

значения, соответствующего текущему значению расхода воздуха. При уменьшении расхода воздуха относительно определенного значения нужно обязательно автоматически уменьшать подачу топлива в топку.

Автоматизация процесса выпаривания. Основные схемы автоматизации рассмотрим на примере двухкорпусной выпарной установки. Цель управления выпарной установки состоит в получении раствора заданной концентрации Q_y , а также в поддержании материального и теплового балансов. Концентрация упаренного раствора зависит от расхода, концентрации и температуры исходного раствора, расхода и давления греющего пара, давления в выпарных аппаратах. В соответствии с целью управления схемой автоматизации предусматривают регулирование концентрации упаренного раствора (рис. VII-16). Концентрацию Q_y можно измерить кондуктометрическим методом, по плотности раствора, по показателю преломления света или по величине температурной депрессии раствора, т. е. по разности температур кипения ΔT раствора и растворителя. Последний метод вследствие простоты и наличия однозначной зависимости между величинами Q_y и ΔT при постоянном давлении применяют довольно часто. При этом первичный измерительный преобразователь температуры кипения раствора устанавливают на трубопроводе кипящего раствора после кипяtilьника, и измерительный преобразователь температуры кипения растворителя — на трубопроводе отвода паров растворителя. Эти приборы комплектуют передающим преобразователем, сигнал на выходе которого пропорционален разности температур ΔT . Регулятор концентрации Q_y воздействует на клапан, установленный на линии отвода упаренного раствора из последнего выпарного аппарата. При возрастании, например, текущей концентрации относительно заданного значения регулятор увеличивает расход упаренного раствора, что уменьшает время пребывания его в

аппарате и вызывает понижение концентрации раствора до заданного значения.

При отводе упаренного раствора из последнего аппарата по его концентрации материальный баланс установки поддерживают, сохраняя равенство между количеством растворенного вещества, уходящим из установки, и количеством вещества, поступающего с исходным раствором. Это обеспечивается поддержанием постоянства уровня раствора в выпарных аппаратах путем воздействия на клапаны, установленные на трубопроводах подачи раствора в соответствующий аппарат. При возрастании расхода упаренного раствора уровень в аппарате понижается, что вызывает увеличение подачи раствора в аппарат. В качестве измерительных преобразователей АСР уровня раствора в выпарных аппаратах 1 обычно используют гидростатические уровнемеры.

Тепловой баланс процесса выпаривания при небольших колебаниях расхода исходного раствора обеспечивают регулятором расхода на трубопроводе подачи греющего пара в кипятильник 2 первого корпуса установки. Нормальный тепловой режим работы выпарной установки возможен только при подаче исходного раствора с постоянной температурой T_n , близкой к температуре кипения раствора. Для достижения этого устанавливают регулятор температуры исходного раствора, выходной сигнал которого воздействует на клапан, изменяющий подачу (греющего пара в теплообменник — подогреватель исходного раствора 3.

Если весь вторичный пар из предыдущего корпуса направляют в кипятильник 2 последующего, то давление (разрежение) стабилизируют только в последнем корпусе, изменяя с помощью регулятора количество отводимых из него паров растворителя. Последнее обычно достигают путем изменения подачи охлаждающей воды в барометрический конденсатор 4. При такой схеме регулирования в корпусах устанавливаются все меньшие давления по ходу раствора и обеспечивается разность температур между вторичным паром из предыдущего корпуса и раствором, кипящим в последующем корпусе, т. е. обеспечивается движущая сила процесса выпаривания.

Концентрацию упаренного раствора Q_y можно также регулировать изменением расхода раствора, подаваемого на последний корпус из предыдущего. Упаренный раствор из последнего корпуса в этом случае отводят по команде регулятора по уровню. При таких схемах регулирования материального баланса выпарной установки количество поступающего на нее исходно-то раствора определяется условиями ее работы. Это требует установки дополнительной технологической емкости исходного раствора.

Не рекомендуется стабилизировать концентрацию упаренного раствора в последнем корпусе воздействием на подачу свежего раствора на установку. Вследствие большого запаздывания

Если расход исходного раствора зависит от работы предшествующих технологических установок, но колебания его незначительны, то концентрацию упаренного раствора можно регулировать изменением подачи греющего пара на установку. При этом с помощью регуляторов уровня в выпарных аппаратах изменяют количество отводимого из них раствора.

В этом случае греющий пар подают на установку в определенном соотношении с расходом исходного раствора, применяя регулятор соотношения, воздействующий на подачу пара. Это соотношение корректируют регулятором концентрации растворенного вещества в исходном растворе. Для стабилизации работы второго выпарного аппарата частично упаренный раствор, направляемый в него, регулируется по каскадной схеме регулирования расхода с корректировкой по уровню раствора в первом выпарном аппарате. Упаренный раствор отводят с установки по уровню в последнем аппарате, регулятором, заданием которому изменяет регулятор концентрации растворенного вещества в упаренном растворе. Давление в системе поддерживается на заданном значении посредством регулирования расхода паров растворителя с коррекцией по давлению в последнем выпарном аппарате.

The diagram illustrates a two-stage distillation process. The first stage (left) starts with an 'Исходный раствор' (Initial solution) entering a reboiler (3). The vapor (Пар) from the reboiler is controlled by a QRC and FFR controller and enters the top of the first distillation column (1). The liquid from the bottom of the first column is controlled by a TRC and FRC controller and enters a condenser (2). The condensed liquid (Конденсат) is then fed into the top of the second distillation column (1). The vapor from the top of the second column is controlled by a PRC and FRC controller and enters a condenser (2). The condensed liquid (Конденсат) is then fed into a separator (4). The top product from the separator is 'Пары растворителя' (Solvent vapors), and the bottom product is 'Упаренный раствор' (Concentrated solution). The separator (4) also receives 'Вода' (Water) and is controlled by a TdRC and LRC controller.

250

4. Автоматизация массообменных процессов

Массообменные процессы широко распространены в химической технологии и применяются с целью разделения смеси веществ или получения целевого продукта заданного состава путем перевода одного или нескольких компонентов из одной фазы в другую.

Основной регулируемой величиной в таких процессах является концентрация определенного компонента в получаемом продукте или содержание в этом продукте примесей, определяемых анализаторами качества. Причем, предпочтительнее определять содержание примесей, так как при этом может быть обеспечена значительно большая чувствительность, чем при измерении концентрации целевого продукта. В ряде случаев процессы массообмена успешно регулируют по косвенным величинам (плотности, показателю преломления света и др.), что не требует установки дорогостоящих анализаторов.

Интенсивность протекания массообменных процессов зависит от гидродинамического режима потоков веществ в технологических аппаратах, а также от тепло- и массообмена между этими потоками. Как правило, аппараты, в которых протекают массообменные процессы, обладают большой инерционностью и запаздыванием.

Автоматизация процесса абсорбции. Абсорбция — это процесс поглощения определенных компонентов исходной газовой смеси при контактировании ее с жидкостью (абсорбентом) с целью разделения этой смеси или получения растворов компонентов.

Целью управления процессом абсорбции является поддержание постоянства заданной концентрации извлекаемого компонента в обедненном газе, а также соблюдение материального и теплового балансов абсорбционной установки. В ряде случаев целью процесса абсорбции является получение насыщенного абсорбента заданного состава. Концентрацию извлекаемого компонента в обедненном газе можно определить по разности количеств извлекаемого компонента, приходящего с сырьем и поглощаемого из нее абсорбентом в единицу времени.

На процесс абсорбции решающее влияние оказывает движущая сила, которая определяется относительным расположением рабочей и равновесной линий процесса. Положение рабочей линии зависит от начальной и конечной концентраций компонента в обеих фазах, а положение равновесной линии — от температуры и давления в аппарате. Из этого следует, что концентрация извлекаемого компонента в обедненной смеси зависит от его начальных концентраций в газовой и жидкой фазах, расхода поступающей газовой смеси, относительного расхода абсорбента, а также от температуры и давления в абсорбере.

Изменения расхода газовой смеси и начальных концентраций извлекаемого компонента в фазах представляют собой

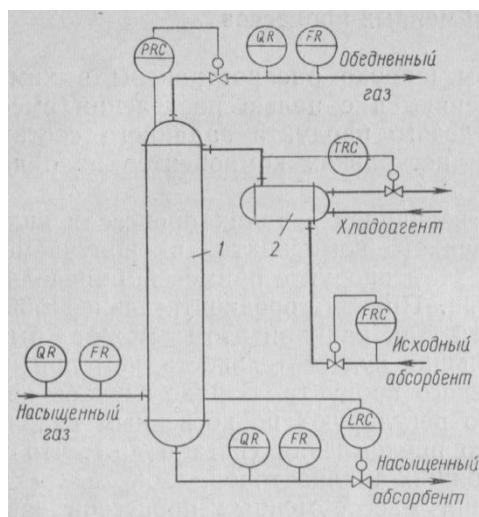


Рис. VII-18. Схема стабилизации процесса абсорбции: 1 — абсорбер; 2 — холодильник.

выходные величины предыдущих технологических аппаратов, а следовательно, представляют собой основные возмущения процесса абсорбции. Регулирующими воздействиями являются расходы свежего абсорбента, обедненного газа и насыщенного абсорбента.

Схема стабилизации процесса абсорбции приведена на рис. VII-18. Основным управляющим воздействием, поддерживающим постоянство концентрации извлекаемого компонента в обедненном газе, является изменение расхода свежего абсорбента, осуществляемое регулятором расхода. Такая схема обеспечивает приемлемое качество регулирования только при равномерной подаче исходного продукта и постоянных начальных концентрациях извлекаемого компонента в газовой и жидкой фазах.

Температура в абсорбере зависит от температур, теплоемкостей и расходов газовой и в большей степени жидкой фаз, а также от интенсивности выделения тепла в процессе абсорбции и потерь тепла в окружающую среду. Большинство этих величин колеблется во времени, что приводит к нарушению теплового баланса и изменению температуры в абсорбере. Повышение последней замедляет протекание процесса. Во избежание этого для интенсификации процесса абсорбент перед подачей его в абсорбер 1 охлаждают в холодильнике 2. Охлаждение абсорбента можно поддерживать по его температуре на выходе из холодильника, при этом регулятор воздействует на клапан, изменяющий расход хладагента.

Повышение давления в абсорбере способствует извлечению ценных компонентов из исходной газовой смеси. Поддержание заданного значения давления в верхней части колонны требует применения регулятора давления, действующего на клапан, установленный на трубопроводе отвода обедненного газа из абсорбера.

Для предотвращения проскока газовой смеси из абсорбера в линию насыщенного абсорбента в кубе абсорбера собирают некоторое количество жидкости, уровень которой поддерживается регулятором, управляющим клапаном, установленным на линии отвода насыщенного абсорбента в десорберы. АСР

уровня обеспечивается соблюдение материального баланса абсорбента.

При эксплуатации установки контролю подлежат расходы и температуры всех материальных потоков, составы исходной газовой смеси и обедненного газа, уровень в кубе абсорбера, давление и перепад давления в нем.

При переменном составе и расходе исходной газовой смеси, поступающей на абсорбер, с целью повышения качества регулирования заданной степени извлечения компонентов из нее используют многоконтурные системы (рис. VII-19). Компенсация изменения расхода исходного насыщенного газа (нагрузки абсорбера по газу) обеспечивается путем использования регулятора соотношения расходов этого газа и свежего абсорбента; выходной сигнал регулятора управляет подачей абсорбента. При переменной концентрации извлекаемого компонента в исходной газовой смеси дополнительно предусматривают корректировку соотношения расходов насыщенного газа и свежего абсорбента с помощью регулятора концентрации извлекаемого компонента в газовой смеси, выход которого направляется в корректирующую камеру регулятора соотношения. Однако, основной регулируемой величиной в этой системе является концентрация извлекаемого компонента в обедненном газе. Текущее значение данной величины поступает на свой регулятор, вырабатывающий сигнал, который в качестве задания подается на регулятор концентрации извлекаемого компонента в исходной газовой смеси, что также приводит к изменению соотношения расходов веществ, поступающих в абсорбер. С помощью рассмотренной системы минимизируются потери ценного компонента, содержащегося в уходящем обедненном газе.

Насыщенный абсорбент, отбираемый из куба абсорбера направляют на десорбцию, т. е. извлечение поглощенного в нем ценного компонента. Поэтому качественное регулирование состава насыщенного абсорбента, если он не является конечным продуктом, не обязательно; достаточно обеспечить равномерную подачу насыщенного абсорбента в десорбер и одновременно поддерживать постоянство уровня в кубе абсорбера. Для этого применяют двухконтурную

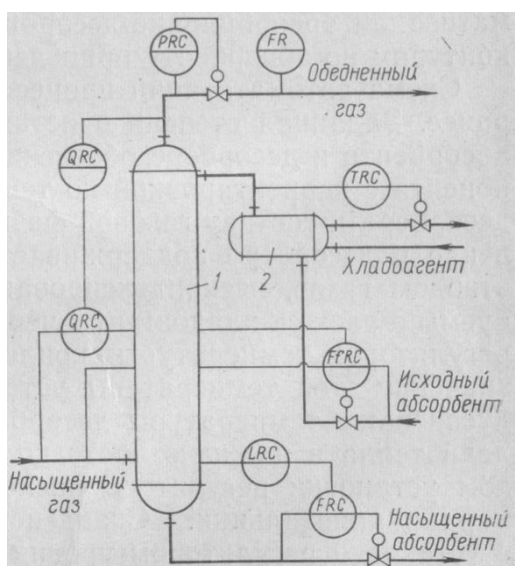


Рис. VII-19. Схема многоконтурного регулирования процесса абсорбции:
1 — абсорбер; 2 — холодильник.

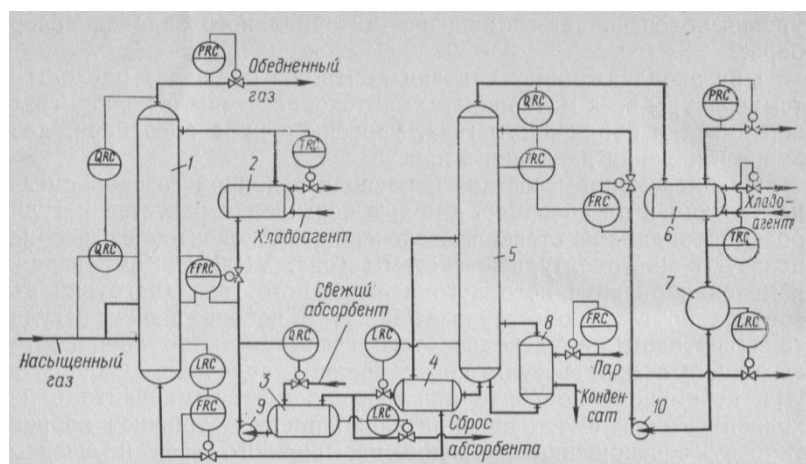


Рис. VII-20. Схема автоматизации процесса абсорбции-десорбции:

- 1 — абсорбер; 2 — холодильник; 3 — емкость абсорбента; 4 — теплообменник; 5 — десорбер;
6 — дефлегматор; 7 — емкость; 8 — кипятильник; 9, 10 — насосы.

каскадную систему регулирования, воздействующую на расход отводимого из абсорбера кубового продукта. Стабилизирующим регулятором в этой системе является регулятор расхода насыщенного абсорбента, а корректирующим — регулятор уровня в кубе абсорбера.

Возмущение по расходу хладагента можно скомпенсировать с помощью каскадной системы регулирования расхода хладагента с корректировкой по температуре охлажденного абсорбента.

В промышленных схемах насыщенный абсорбент десорбируют и регенерируют для повторного использования. Схема автоматизации абсорбционно-десорбционной установки с замкнутым контуром по абсорбенту приведена на рис. VII-20.

Схема автоматизации процесса абсорбции была рассмотрена ранее. Заданная степень очистки компонента газовой смеси от абсорбента в десорбере обеспечивается АСР расхода этого компонента с корректировкой по температуре в укрепляющей части десорбера и составу газовой фазы на выходе из десорбера. Давление в десорбере поддерживается регулятором, управляющим отводом газов, несконденсировавшихся в дефлегматоре 6. Требуемый расход хладагента через дефлегматор обеспечивается регулятором температуры сконденсировавшихся газов. Заданное значение этой температуры устанавливается на несколько градусов ниже температуры десорбируемого газа. Постоянство подачи тепла в нижнюю часть колонны обеспечивается посредством установки регулятора расхода на линии подачи греющего пара в кипятильник. Сконденсировавшиеся пары отводятся с установки регулятором уровня в емкости 7, а абсорбент регулятором уровня в кубе десорбера.

При такой схеме автоматизации абсорбент после десорбера может содержать некоторое количество компонентов исходной газовой смеси, что будет влиять на состав обедненного газа. Поэтому для улучшения процесса абсорбции в систему необходимо постоянно вводить определенное количество свежего абсорбента и отводить такую же часть отработанного. Ввод свежего абсорбента в систему поддерживается регулятором состава абсорбента, направляемого в абсорбер, а вывод отработанного абсорбента из системы — регулятором уровня в емкости абсорбента 3.

Автоматизация процесса ректификации. Задача управления процессом ректификации состоит в получении целевого продукта заданного состава при установленной производительности установки и минимальных затратах теплоагентов.

Исходная смесь нагревается в теплообменнике 1 (рис. VII-21) водяным паром до температуры кипения и поступает в ректификационную колонну 3 на тарелку питания. Находящаяся в кубе колонны жидкость испаряется в выносном кипятильнике 2, обогреваемом паром, и в виде паровой фазы проходит вверх по колонне. Паровой поток, выходя из колонны, попадает в охлаждаемый хладагентом, например, водой, дефлегматор 4 где пары конденсируются. Образовавшаяся жидкая фаза стекает в флегмовую емкость 5, откуда насосом 6 нагнетается в верхнюю часть колонны на орошение в виде флегмы и частично отводится с установки в виде дистиллята. Флегма стекает вниз по колонне.

При многократном контакте в ректификационной колонне парового и жидкого потоков, движущихся навстречу друг другу и имеющих разные температуры, паровая фаза обогащается более легколетучими низкокипящими компонентами (НКК), а жидкая фаза — труднолетучими высококипящими компонентами (ВКК). Часть кубового продукта, называемая остатком, отводится с установки. Целевыми продуктами ректификационной установки могут быть дистиллят или кубовый остаток, что определяется технологической схемой.

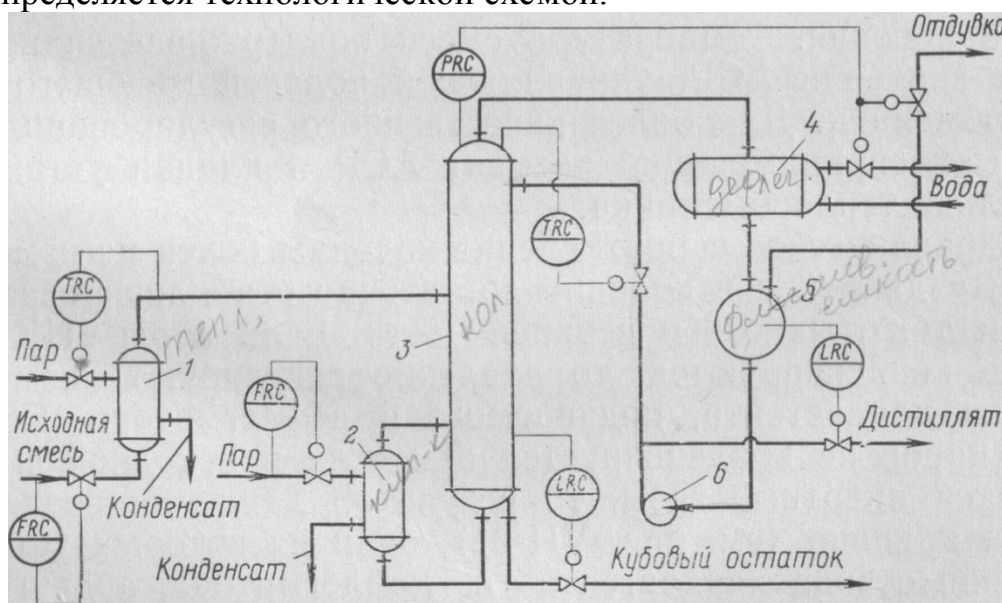


Рис. VII-21. Схема стабилизации процесса ректификации:

- 1 — теплообменник; 2 — кипятильник; 3 — ректификационная колонна;
4 — дефлегматор; 5 — флегмовая емкость; 6 — насос.

Основными регулируемыми технологическими величинами процесса являются составы дистиллята или кубового остатка. На чистоту этих целевых продуктов оказывают влияние ряд возмущающих воздействий процесса — состав, расход и температура исходной смеси, параметры тепло- и хладагента, давление в колонне и другие величины. Основные управляющие воздействия — это расходы флегмы в колонну и теплоносителя в кипятильник. Причем изменение расхода флегмы относительно быстро приводит к изменению состава дистиллята и одновременно с большим запаздыванием и в значительно меньшей степени — к изменению состава кубового остатка.

Изменение же расхода греющего пара приводит в основном к изменению состава кубового остатка; состав флегмы при этом изменяется намного слабее.

Существует большое количество схем автоматизации ректификационных установок. На схеме (см. рис. VII-21) осуществляется стабилизация отдельных величин с помощью локальных одноконтурных АСР. Эти АСР связаны между собой через процесс и обеспечивают соблюдение материального и теплового балансов установки.

Колебание подачи исходной смеси в колонну является одним из наиболее сильных возмущений процесса. Поэтому, если на технологической схеме возможно, то для обеспечения постоянства подачи смеси предусматривают АСР расхода. Воспринимающий элемент (диафрагма, ротаметр) и регулирующий клапан этой системы монтируются на трубопроводе до теплообменника; это делается для того, чтобы исходная смесь протекала через них только в жидкой фазе. Наличие АСР расхода исходной смеси существенно облегчает работу всех других АСР установки.

Исходная смесь должна подаваться в колонну при температуре кипения. Температура смеси поддерживается на постоянном значении АСР, управляющей подачей греющего пара в теплообменник. Для более качественного регулирования температуры воспринимающий элемент АСР и клапан устанавливают вблизи теплообменника.

Гидравлическое сопротивление колонны почти не изменяется. Поэтому давление в колонне достаточно стабилизировать в одном месте, обычно — в верхней части. Если пары НКК полностью конденсируются, то давление регулируют изменением расхода хладагента, подаваемого в дефлегматор. Если же часть паров не конденсируется или если в исходной смеси содержатся инертные газы, то регулятор давления воздействует на два клапана (см. рис. VII-21), один из которых установлен на линии отвода хладагента из дефлегматора, а другой — на линии отдувки. Причем рабочие участки характеристик этих клапанов должны быть различны. Ход плунжера первого из них должен находиться в пределах примерно 0—75% регулирующего воздействия, а второго — в пределах 50—100%.

В результате несконденсировавшиеся газы сбрасываются из флегмской емкости только при больших расходах хладагента, поступающего в дефлегматор, и продолжающемся повышении давления в колонне.

Если целевым продуктом является дистиллят, то основной технологической величиной ректификационной установки будет состав паров в верхней части колонны. Состав дистиллята регулируют изменением подачи флегмы в колонну. При этом регулирующий орган может быть установлен как на линии подачи флегмы, так и на линии отвода дистиллята. С точки зрения статики это равноценно. Однако для повышения качества регулирования регулирующий орган АСР состава необходимо устанавливать на линии подачи флегмы в колонну, при этом для сохранения материального баланса укрепляющей части колонны дистиллят необходимо отводить с помощью АСР уровня во флегмовой емкости. Иначе инерционные свойства емкости будут влиять на качество процесса регулирования, что может привести к нежелательным последствиям.

Согласно правилу фаз при разделении бинарной смеси, если давление в колонне постоянно, состав дистиллята и температура однозначно связаны между собой. Поэтому для управления подачей флегмы применяют регулятор температуры верхней части колонны.

Если число тарелок в колонне велико или разность температур кипения разделяемых компонентов невелика, запаздывание в объекте достигает нескольких десятков минут и более. Поэтому измерение температуры вверху колонны приводит к большим отклонениям технологического режима от регламента, так как регулирующие воздействия будут введены в процесс с большим запаздыванием.

Для повышения качества регулирования чувствительный элемент температуры следует устанавливать на так называемой контрольной тарелке укрепляющей части колонны, т. е. там, где температура значительно более чувствительна к изменению подачи флегмы и где обеспечено меньшее запаздывание при изменении состава исходной смеси.

В настоящее время появилась возможность регулировать не температуру в колонне, т. е. косвенный показатель, а непосредственно состав целевых продуктов. В качестве анализаторов состава используют хроматографы, газоанализаторы, плотномеры, рефрактометры и другие приборы.

Для повышения чувствительности АСР состава измеряют содержание примесей в целевом продукте. Пробы продукта к анализаторам состава отбирают также на контрольной тарелке колонны, но расположенной ближе к верху (низу) колонны, чем при регулировании температуры. При использовании промышленных анализаторов состава (при их наличии для данной смеси) следует иметь в виду, что они менее надежны, чем измерители температуры.

При мало изменяющемся составе исходной смеси подача греющего пара в выносной кипятильник стабилизируется АСР расхода. Использование для этой цели регулятора, однотипного с тем, который управляет подачей флегмы в колонну, нежелательно, так как их взаимозависимость через процесс может привести к возникновению колебательного режима работы колонны.

Материальный баланс отгонной части колонны поддерживается АСР уровня в кубе, воздействующей на отвод продукта.

Если целевым продуктом является кубовый остаток, то к протеканию процесса в отгонной части колонны предъявляются более жесткие требования, чем к процессу в укрепляющей части. С этой целью регулируют состав кубового остатка, а точнее содержание НКК в кубовом продукте, изменяя подачу греющего пара в кипятильник. В случае бинарной смеси таким же образом регулируют температуру на контрольной тарелке нижней части колонны. Для уменьшения запаздывания сигнал температуры иногда отбирают и на линии поступления паровой фазы непосредственно в колонну, но только, если параметры теплоносителя более сильно влияют на протекание процесса, чем параметры исходной смеси. При этом подача флегмы в колонну стабилизируется АСР расхода. В остальном схема автоматизации установки остается прежней.

Парообразование в кипятильнике определяет гидродинамический режим колонны. При интенсивном образовании пара может наступить «захлебывание», при котором восходящий поток пара препятствует стеканию жидкости вниз и увлекает капли жидкости вверх. При недостаточном паровом потоке снижается производительность установки.

Недостатком рассмотренной выше схемы стабилизации, состоящей из отдельных одноконтурных АСР, является то, что возмущающие воздействия существенно изменяют режим работы колонны, вследствие довольно большого запаздывания протекающих в ней процессов, причем это происходит еще до того, как регуляторы основных технологических величин начнут компенсировать влияние возмущений. Для повышения качества

разделения исходной смеси в АСР основных величин установки вводят стабилизирующие контуры.

На рис. VII-22 приведена одна из возможных схем регулирования процесса ректификации с использованием

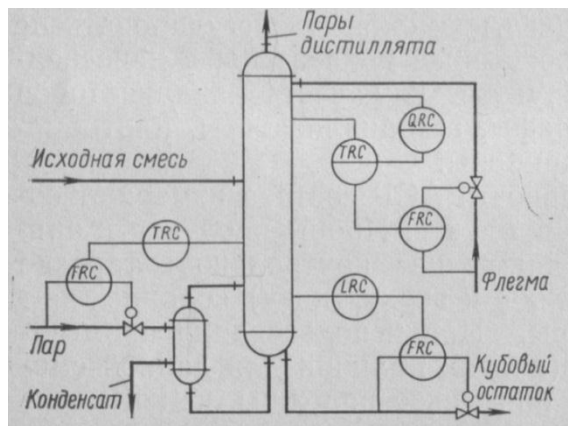


Рис. VII-22 Схема каскадного регулирования процесса ректификации.

каскадных систем, когда целевым продуктом является дистиллят. В этом случае подачей флегмы в колонну управляет трехконтурная система регулирования, в которой регулятор состава дистиллята вырабатывает корректирующий сигнал, направляемый в качестве задания регулятору температуры на контрольной тарелке колонны, а последний корректирует работу регулятора подачи флегмы в колонну. При наличии надежного анализатора состава контур регулирования температуры из рассмотренной системы можно исключить.

Для подачи греющего пара в кипятильник применяют систему регулирования расхода, задание которой изменяет регулятор температуры на контрольной тарелке отгонной части колонны.

При дальнейшем разделении кубового остатка необходима одновременно обеспечить постоянство его уровня в кубе колонны и постоянство подачи на следующую по технологической линии установку. Для этой цели используют систему регулирования расхода кубового остатка со стабилизирующим регулятором, задание которому корректируется регулятором уровня продукта в кубе колонны.

Если целевым продуктом является кубовый остаток, то для обеспечения его заданной чистоты применяют систему регулирования расхода греющего пара в кипятильник с корректировкой по температуре в отгонной части колонны и по составу кубового продукта на контрольной тарелке. Возможно также использование более простой системы без вспомогательного контура регулирования температуры. Так как в данном случае к дистилляту повышенных требований по чистоте не предъявляется, то для управления подачей флегмы в колонну достаточно системы регулирования расхода. Предусматривается также система регулирования расхода балансового избытка дистиллята, направляемого далее на разделение, с корректировкой его по уровню во флегмовой емкости. Кубовый продукт отводится с установки посредством регулятора уровня в кубе колонны.

По сравнению с одноконтурными каскадные системы обеспечивают лучшее регулирование основных технологических величин ректификационной установки. Однако вследствие медленного протекания в ней тепло- и массообменных процессов, они успешно компенсируют только сравнительно малые возмущения по составу исходной смеси.

В промышленной практике расход исходной смеси часто определяется работой предыдущей технологической установки и довольно сильно колеблется во времени. Это требует введения в АСР составов дистиллята и кубового остатка дополнительных контуров по возмущению, учитывающих изменение расхода исходной смеси.

На рис. VII-23 показаны системы регулирования состава дистиллята (а) и кубового остатка (б) с учетом изменения расхода исходной смеси. В первом случае в системе регулирования предусмотрен регулятор соотношения расходов исходного сырья

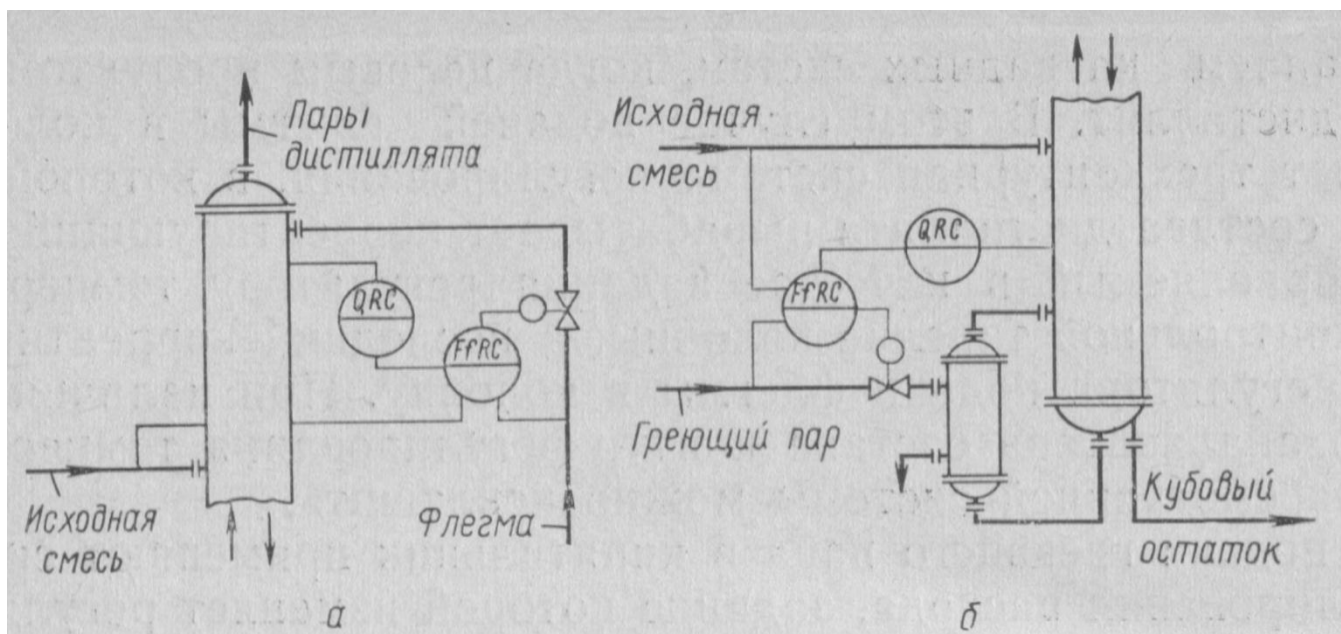


Рис. VII-23. Схемы регулирования состава дистиллята (а) и кубового остатка (б) с учетом изменения расхода исходной смеси.

и флегмы, управляющий подачей флегмы. На этот регулятор подается корректирующий сигнал от регулятора состава продукта в укрепляющей части колонны. При увеличении расхода исходной смеси регулятор соотношения увеличивает расход флегмы в колонну, и наоборот. Текущее значение соотношения расходов исходной смеси и флегмы непрерывно корректируется регулятором состава в зависимости от содержания ВКК на контрольной тарелке укрепляющей части колонны.

Во втором случае выходной сигнал регулятора состава отгонной части колонны направляется на регулятор соотношения расходов исходного сырья и греющего пара, управляющий подачей пара на установку. Возможно также одновременное введение сигнала, пропорционального изменению скорости подачи сырья на установку, в системы регулирования укрепляющей и отгонной частей колонны.

Такие системы регулирования реагируют на изменение расхода исходной смеси прежде, чем это возмущение окажет влияние на протекание процесса.

При значительном изменении состава исходной смеси в системы регулирования состава дистиллята и кубового остатка вводят дополнительные контуры регулирования, учитывающие это возмущение. Вариант системы, предназначенной для поддержания постоянства состава дистиллята, приведен на рис. VII-24, а. Выходной сигнал регулятора, пропорциональный содержанию НКК в исходной смеси, направляется как задание на регулятор подачи флегмы в колонну. В свою очередь задание регулятору, анализирующему состав исходной смеси, формируется регулятором состава на контрольной тарелке укрепляющей части колонны.

При отсутствии анализатора состава исходной смеси и при часто наблюдаемом довольно медленном изменении этой величины изменение содержания НКК или ВКК в исходной смеси может быть скомпенсировано поддержанием соотношения

расходов дистиллята или кубового остатка и исходной смеси. Эти регуляторы соотношения встраиваются в соответствующие системы регулирования основных технологических величин. Такая система регулирования состава дистиллята приведена на рис. VII-24, б. При возрастании, например, содержания НКК в исходной смеси, увеличивается количество паров, отводимых из колонны, что воспринимается регулятором соотношения расходов дистиллята и исходной смеси, который увеличивает подачу флегмы в колонну, вследствие чего отбор дистиллята с установки также возрастает.

В случае одновременного изменения расхода и состава смеси может быть рекомендована система регулирования состава дистиллята, приведенная на рис. VII-25. Выходные сигналы анализатора содержания НКК в исходной смеси и измерителя ее расхода направляются в вычислительное устройство, которое определяет текущее количество НКК, поступающего в колонну в единицу времени. Выход этого устройства воздействует на регулятор расхода, управляющий подачей флегмы в колонну. При этом сигнал вычислительного устройства необходимо корректировать по составу верхнего продукта колонны. Данная система обеспечивает отбор дистиллята заданного состава в соответствии с количеством НКК, поступающего в колонну. Аналогичная система может быть составлена и для регулирования состава кубового остатка.

Введение в системы регулирования основных технологических величин дополнительных контуров, учитывающих изменение расхода и состава исходной смеси приводит к повышению качества целевого продукта или увеличению его выхода, а также к снижению энергозатрат на проведение процесса.

Автоматизация процесса экстракции. Жидкостной экстракцией называют диффузионный процесс перехода экстрагируемого

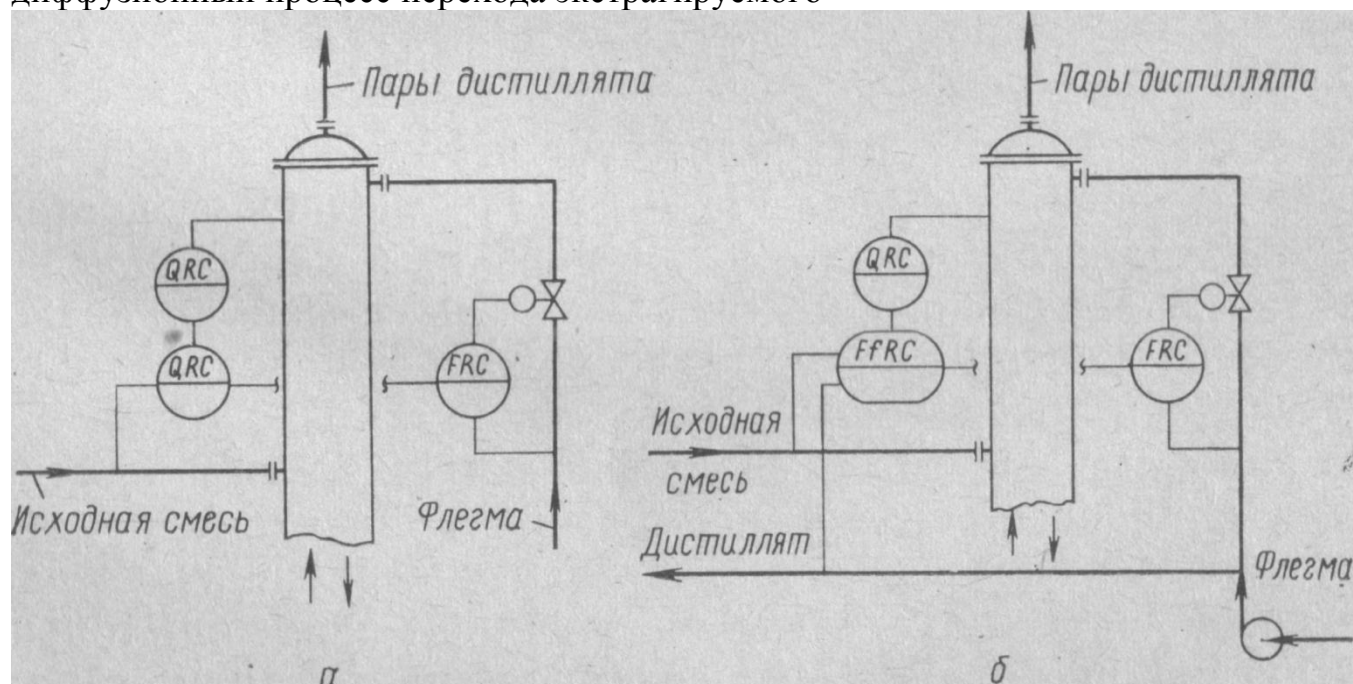


Рис. VII-24. Схемы регулирования состава дистиллята с учетом изменения состава исходной смеси при использовании анализатора качества (а) и без него (б).

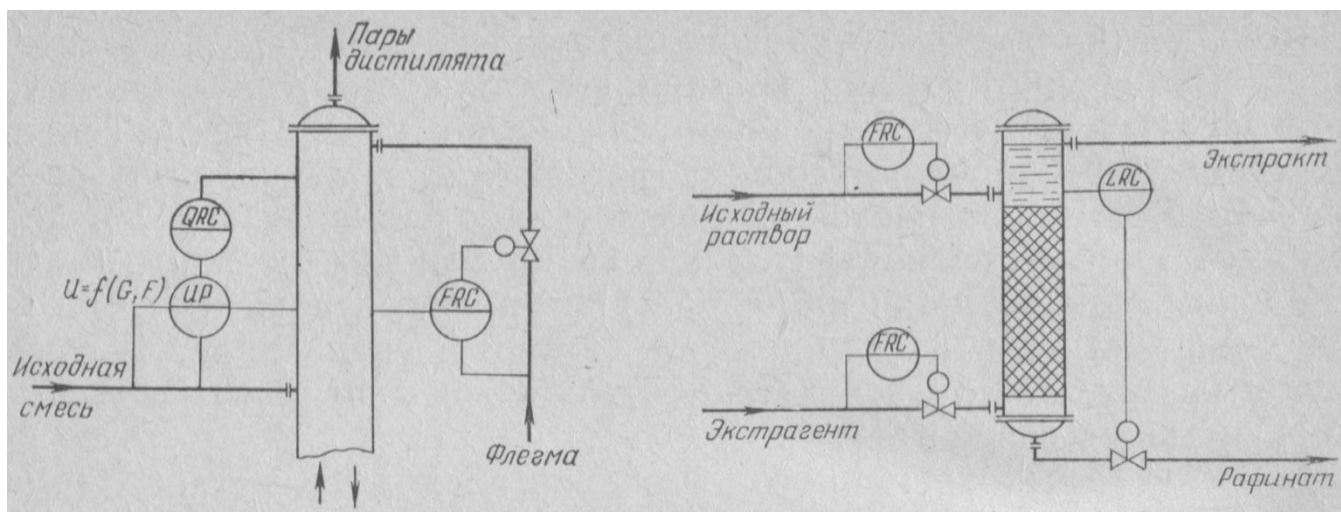


Рис VII-25. Система регулирования состава дистиллята с учетом изменения расхода и состава исходной смеси.

Рис VII-26. Схема стабилизации процесса экстракции

вещества или веществ из одной жидкой фазы в другую при условии, что эти жидкости взаимно нерастворимы или растворимы частично. В результате получают экстракт—раствор извлеченных веществ в экстрагенте и рафинат— остаточный исходный раствор. Экстракт и рафинат разделяют (обычно отстаиванием). Далее из экстракта извлекают целевой продукт, а из рафината регенерируют экстрагент.

В промышленности экстракцию проводят в экстракторах различных конструкций. Рассмотрим схемы регулирования насадочных экстракционных колонн, в которых исходный раствор и экстрагент движутся в противотоке (рис. VII-26).

Задача управления процессом экстракции заключается в получении экстракта с заданным содержанием экстрагируемого компонента, которое является основной регулируемой величиной, а расход экстрагента — основной регулирующей величиной. На содержание экстрагируемого компонента в экстракте влияют не только расход экстрагента, но и расход исходного раствора, а также содержание экстрагируемого вещества в исходном растворе и экстрагенте.

Простейшая схема стабилизации потоков процесса экстракции, приведенная на рис. VII-26, предусматривает постоянство подачи исходного раствора и экстрагента в колонну. Для обеспечения материального баланса колонны в пей поддерживают постоянство уровня экстракта посредством перелива и регулируют уровень поверхности раздела фаз, изменяя отвод рафината из колонны. Уровень раздела фаз измеряют гидростатическими или поплавковыми уровнемерами. Такая схема регулирования удовлетворительно поддерживает содержание экстрагируемого компонента в экстракте на заданном значении только при практически постоянном его содержании в исходном растворе экстрагента.

При переменном составе исходного раствора в систему регулирования расхода экстрагента вводят дополнительный контур

регулирования состава одного из потоков на выходе из колонны. С целью повышения чувствительности регулирование обычно ведут по содержанию экстрагируемого вещества в рафинате.

Для достижения заданного содержания экстрагируемого вещества в экстракте необходимо, чтобы между расходами исходного раствора и экстрагента существовала пропорциональная зависимость. Эта зависимость может быть обеспечена посредством изменения расхода экстрагента, так как расход исходного раствора представляет собой нагрузку рассматриваемого объекта. Система регулирования соотношения расходов исходного раствора и экстрагента приведена на рис. VII-27. Компенсация изменения концентрации исходного раствора осуществляется введением в АСР соотношения расходов контура регулирования состава рафината; тогда при изменении концентрации экстрагируемого вещества в рафинате будет скорректировано соотношение расходов исходного раствора и экстрагента. При значительных колебаниях состава исходного раствора предусматривают также контур регулирования по возмущению.

Автоматизация процесса сушки. Сушка — тепловой процесс обезвоживания твердых материалов путем испарения влаги и отвода образующихся паров. При этом в веществе происходит перенос тепла и диффузионное перемещение влаги. Продолжительность процесса сушки определяется интервалом времени, необходимым для понижения влагосодержания материала от начального значения M_n до конечного M_k .

В химической промышленности наиболее распространена конвективная сушка, которая проводится в барабанных сушилках и сушилках с псевдоожиженным (кипящим) слоем.

Цель управления процесса сушки заключается в обеспечении высушивания поступающего влажного твердого материала до заданного влагосодержания при определенной производительности установки по влажному материалу. Основными возмущениями процесса являются изменение расхода, начальной влажности и дисперсного состава частиц твердого материала, а также изменение расхода и начальной температуры сушильного агента — теплоносителя. Основная регулируемая величина процесса — это остаточная влажность твердого материала. Однако, вследствие отсутствия надежных измерительных преобразователей остаточной влажности твердого материала при автоматизации процесса

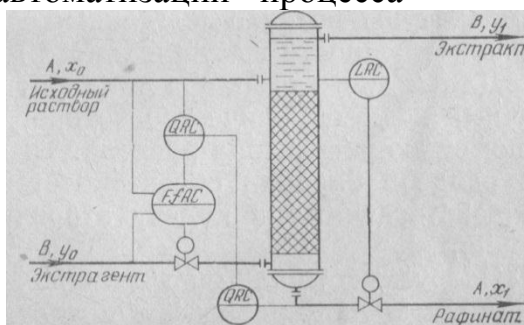


Рис. VII-27. Схема регулирования состава рафината с учетом изменения расхода и состава исходного раствора.

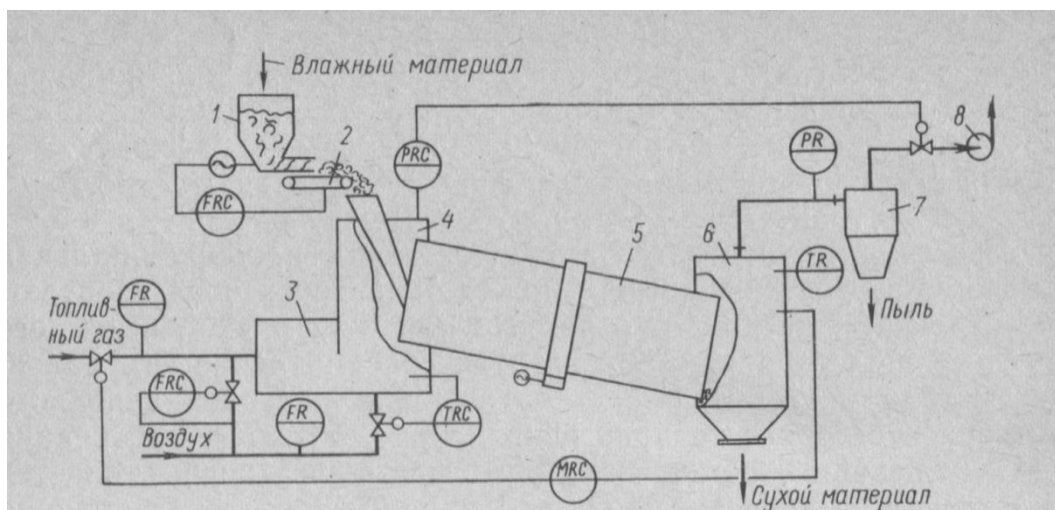


Рис. VII-28. Схема стабилизации процесса сушки в барабанной сушилке:

1 – бункер влажного материала; 2 – дозатор; 3 – топка; 4 – смесительная камера; 5 – сушильный барабан; 6 – бункер сухого материала; 7 – циклон; 8 – вентилятор

в качестве регулируемых величин используют температуру или влажность сушильного агента. Это целесообразно с точки зрения динамики, так как на возмущения эти величины реагируют быстрее.

В барабанной сушилке (рис. VII-28) влажный материал из бункера 1 дозатором 2 подается в барабан 5, в который также поступает горячий воздух, нагреваемый в топке 3 за счет, например, сжигания топливного газа. При вращении барабана частицы твердого материала перемещаются вдоль его оси. В том же направлении прямо по барабану проходит горячий воздух, отдавая тепло частицам материала и испаряя находящуюся в них влагу. Высушенный материал сыпается из барабана в бункер 6, а воздух через циклон 7 отсасывается вентилятором 8. Продолжительность сушки в барабанных сушилках составляет несколько десятков минут; прохождение воздуха исчисляется секундами.

Процесс сушки обычно регулируют по влажности теплоносителя на выходе из барабана. Регулятор влажности воздействует на клапан, установленный на линии подачи топливного газа в топку. Вследствие того, что температурное распределение теплоносителя по длине барабана приближенно соответствует абсолютной влажности твердого материала, подачу топливного газа можно регулировать по температуре влажного воздуха на выходе из установки. Для более качественной сушки необходимо вручную корректировать задание регулятора влажности или температуры воздуха по данным лабораторного анализа остаточной влажности высушиваемого материала.

Для полного сгорания топливного газа в топку подают первичный воздух, количество которого поддерживают постоянным с помощью регулятора расхода. Требуемая температура воздуха на входе в барабан обеспечивается регулятором температуры, воздействующим на подачу вторичного воздуха в камеру смешения.

Нагрузку сушилки по влажному материалу стабилизируют с помощью АСР расхода, в которую входит измеритель массы,

автоматический регулятор, вторичный прибор со станцией управления и ленточный дозатор с регулируемой скоростью передвижения ленты (выступает в качестве регулирующего органа). При уменьшении количества твердого материала на ленте относительно заданного значения регулятор вырабатывает сигнал, ускоряющий ее движение, и наоборот. В результате обеспечивается постоянство расхода твердого материала в сушильный барабан.

Нагрузка объекта по сушильному агенту (воздух) поддерживается на постоянном значении регулятором разрежения воздуха в смесительной камере, воздействующим на клапан, установленный на линии отвода воздуха после циклона. При постоянном гидравлическом сопротивлении барабана и отсутствии подсоса воздуха из атмосферы система регулирования разрежения обеспечивает постоянство скорости прохождения сушильного агента вдоль барабана. Оптимальное значение скорости воздуха устанавливают с учетом того, что с ее увеличением возрастает скорость сушки твердого материала и одновременно увеличиваются потери тепла с отработанным воздухом.

Контролю и регистрации подлежат расходы топливного газа и вторичного воздуха, а также разрежение и температура в бункере сухого материала.

Схема стабилизации барабанной сушилки обеспечивает высушивание влажного твердого материала до заданной остаточной влажности только при небольших по величине изменениях входных величин процесса сушки. Вследствие большого запаздывания в объекте качественное регулирование процесса возможно лишь с помощью многоконтурных систем. Одна из таких схем регулирования барабанной сушилки приведена на рис. VII-29. В рассматриваемом случае подачей топливного газа на установку управляет каскадная система регулирования температуры воздуха в барабане (стабилизирующий регулятор)

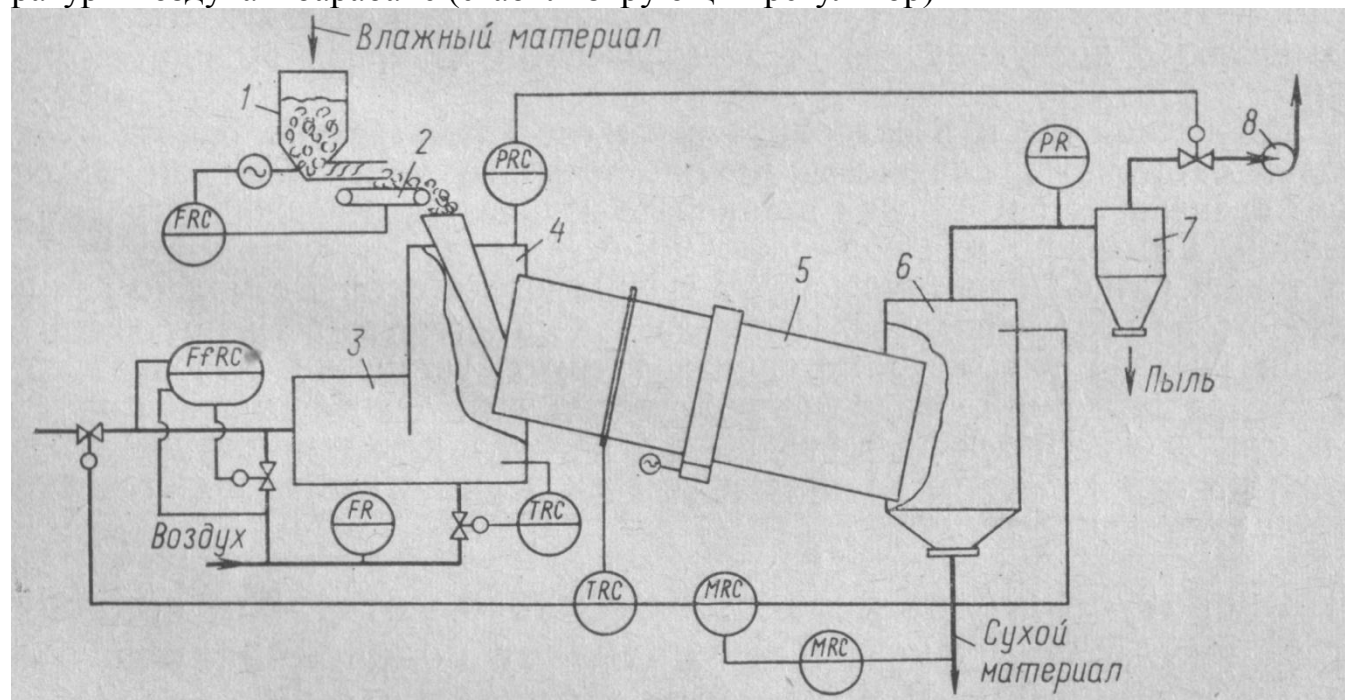


Рис. VII-29. Схема многоконтурного регулирования процесса сушки в барабанной сушилке.

Условные обозначения — см. рис. VII-28.

с корректировкой по влажности воздуха на выходе из сушилки (корректирующий регулятор). При наличии надежного измерительного преобразователя остаточной влажности высушиваемого материала возможно введение в данную систему еще одного контура с регулятором влажности твердого материала, выходной сигнал которого в качестве задания направляют на регулятор влажности сушильного агента. При отсутствии такого измерительного преобразователя и в случае необходимости периодически корректируют задание регулятора влажности сушильного агента по данным лабораторного анализа.

Для повышения чувствительности АСР температуры воздуха измерительный преобразователь (термопара) устанавливают в пределах первой трети длины барабана, так как в начале аппарата температура теплоносителя изменяется более интенсивно, чем в его конце. При этом уменьшается также запаздывание объекта. Термопару монтируют непосредственно на поверхности барабана, а ее свободные концы подсоединяют к передающему преобразователю через специальное токосъемное устройство с подвижными контактами. При необходимости компенсации изменения нагрузки установки по расходу влажного материала можно предусмотреть дополнительный контур регулирования по возмущению этой величины.

Полнота сгорания топливного газа обеспечивается АСР соотношения расходов топливного газа и первичного воздуха, управляющей подачей первичного воздуха в топку. При изменении теплотворной способности топлива целесообразно корректировать это соотношение по содержанию кислорода в топочных газах.

В сушилках) с кипящим слоем (рис. VII-30) процесс сушки продолжается до нескольких минут, сушильный агент (воздух) проходит через сушилку за доли секунды. Влажный материал подается из бункера 1 шнековым питателем в сушилку 4, где он псевдоожижается воздухом, нагреваемым в топке 2 за счет сжигания топливного газа. Воздух отсасывается? Через циклон 5 воздухоудвкой 6, а высушенный материал выводится из сушилки.

Установлено, что в псевдоожиженном слое температура однозначно определяет остаточную влажность частиц твердого материала при фиксированном времени их пребывания в аппарате и является основной регулируемой величиной. Ее можно поддерживать, меняя расход высушиваемого материала, а также расход или температуру сушильного агента. Возможно применение любого из этих вариантов. Использование в качестве регулирующего воздействия расхода влажного материала требует установки дополнительного бункера для этого материала между предыдущей технологической установкой и сушилкой. При использовании же расхода или температуры воздуха следует иметь в виду, что на изменение этих величин наложены ограничения по максимуму и минимуму.

Температура в слое псевдоожиженного материала поддерживается регулятором, который управляет подачей влажного материала в сушилку. Возрастание температуры в слое свидетельствует о понижении среднего значения остаточной влажности частиц твердого материала. Реагируя на это, регулятор

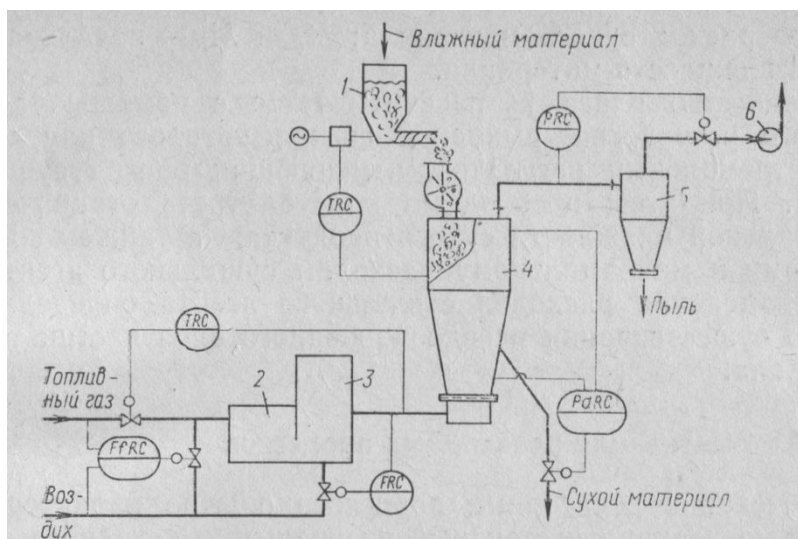


Рис. VII-30. Схема регулирования процесса сушки в аппарате с кипящим слоем высушиваемого материала:

1 — бункер влажного материала; 2 — топка; 3 — смесительная камера; 4 — аппарат с кипящим слоем; 5 — циклон; 6 — воздуходувка.

увеличивает скорость вращения шнека питателя, что приводит к увеличению подачи влажного материала и снижению температуры в слое.

Поддержание постоянства температуры воздуха на входе в сушилку обеспечивается с помощью АСР изменяющей подачу топливного газа в топку. Регулятор соотношения устанавливает подачу первичного воздуха в топку в количестве, необходимом для полного сгорания топливного газа. Расход горячего воздуха, подаваемого в сушилку под распределительную решетку и псевдоожижающего частицы высушиваемого материала, стабилизируется изменением подачи вторичного воздуха в смесительную камеру 3.

Заданное разрежение в сушилке регулируется с помощью клапана, установленного на линии отработанного сушильного агента.

Материальный баланс объекта по твердому материалу соблюдается за счет поддержания постоянства уровня псевдоожиженного материала в сушилке с помощью регулятора, управляющего отводом сухого материала из аппарата. Уровень псевдоожиженного материала измеряется гидростатическим дифманометрическим уровнемером по перепаду давления в сушилке. Изменение расхода сухого материала из аппарата обеспечивается изменением проходного сечения задвижки с пневматическим приводом, работающим от регулятора уровня.

В сушилках с кипящим слоем целесообразно применять экстремальные системы регулирования. В качестве критерия оптимальности можно, например, выбрать количество влаги W , удаляемой из твердого материала в единицу времени:

$$W = F(M_n - M_k)$$

где F — расход сухого материала; M_n и M_k — начальная и конечная влажность материала.

Количество влаги W рассчитывается с помощью вычислительного устройства, выходной сигнал которого направляется на экстремальный регулятор, изменяющий расход сушильного агента. При этом необходимо предусмотреть ограничения по минимальной влажности сухого продукта, а также по минимальному и максимальному расходам сушильного агента. Границы изменения расходов сушильного агента определяют область существования псевдоожиженного слоя частиц твердого материала.

5. Автоматизация реакторных процессов

Протекание реакторных процессов обычно характеризуется скоростью реакции и степенью превращения исходного сырья в продукты реакции. На эти показатели влияют концентрация реагирующих веществ, температура в реакторе, активность катализатора и др. Цель управления заключается в получении продуктов заданного состава путем воздействия на эти величины.

Регулирование расходов реагирующих веществ. С целью полного использования реагирующих веществ необходимо поддерживать заданное (близкое к стехиометрическому) соотношение их расходов. При незначительных изменениях нагрузки реактора это можно обеспечить с помощью систем стабилизации расходов веществ, подаваемых в реактор. При больших колебаниях нагрузки необходимо применять АСР соотношения.

При наличии измерительного преобразователя, реагирующего на состав готового продукта, возможно применение АСР состава, в которых регулятор воздействует на расход реагента или получаемого продукта; во втором случае он влияет на время пребывания реакционной массы в реакторе. Чувствительный элемент преобразователя состава устанавливают в реакторе или на выходном трубопроводе. Для улучшения качества регулирования можно применить каскадную АСР, в которой регулятор состава воздействует на задание регулятора расхода реагента. При значительных изменениях нагрузки реактора целесообразно использовать схему, в которой регулятор состава корректирует соотношение расходов реагирующих веществ.

Регулирование температуры в реакторах с мешалкой осуществляют за счет изменения расхода хладагента, подаваемого в охлаждающую рубашку. В простейшем случае расходом этого хладагента управляют с помощью одноконтурной АСР температуры, чувствительный элемент которой устанавливают в реакторе. Если при отводе тепла реакции хладагент испаряется, то для повышения качества регулирования можно применять каскадную АСР, в которой регулятор температуры действует на задание регулятора давления испаряющегося хладагента,

в свою очередь воздействующего на клапан, установленный на линии отвода паров хладагента. При этом жидкий хладагент подают в рубашку по сигналу от уровня.

В трубчатых реакторах температуру также регулируют изменением подачи хладагента в охлаждающую рубашку. При этом первичный преобразователь температуры устанавливают в месте максимального изменения температуры по длине реактора.

В случаях, когда по каким-либо причинам может резко возрасти скорость выделения тепла реакции, вплоть до превышения максимальной скорости теплоотвода, дополнительно предусматривают систему аварийной защиты, которая обеспечивает останов реакции путем, например, прекращения подачи сырья в реактор.

6. Автоматизация производств химической технологии

В качестве примера рассмотрим схемы автоматизации некоторых широко распространенных химических производств.

Автоматизация производства аммиачной селитры. Производство аммиачной селитры — наиболее распространенного азотного удобрения — отличается крупнотоннажностью. В СССР ее получают нейтрализацией азотной кислоты газообразным аммиаком в крупнотонажных агрегатах АС-67 и АС-72.

Газообразный аммиак и разбавленная (47—60%) азотная кислота (рис. VII-31) подогреваются в теплообменниках (1, 2) и подаются на нейтрализацию под атмосферным давлением в аппарат ИТН (3). При нейтрализации получают раствор аммиачной селитры, который частично упаривается за счет тепла нейтрализации. По выходе из аппарата ИТН раствор аммиачной селитры подвергают донейтрализации аммиаком в аппарате 4 и направляют в выпарной аппарат 6 на упаривание до концентрации 99,7—99,8%.

Для испарения влаги из раствора в аппарат 6 подается греющий пар, сюда же из подогревателя 9 поступает горячий воздух, обеспечивающий отвод влаги. Концентрированный плав аммиачной селитры донейтрализуется аммиаком в гидрозатворе 7, очищается в фильтре 10 и стекает в бак 11. Из бака погружным насосом 12 плав нагнетается в гранулятор 13, установленный в верхней части грануляционной башни 14. При свободном падении капли плава затвердевают и образовавшиеся гранулы аммиачной селитры выводятся из башни ленточным транспортом 15.

В производстве аммиачной селитры нагрузкой является поступление газообразного аммиака. Для устранения колебаний нагрузки, а также других внешних возмущений поддерживают постоянными расход аммиака на линии подачи в нейтрализатор и его давление на входе установки.

На стадии нейтрализации целью регулирования является уменьшение потерь аммиака с соковым паром, выходящим из нейтрализатора. Это обеспечивается поддержанием постоянного соотношения расходов аммиака и азотной кислоты перед подачей их на нейтрализацию в аппарат ИТН. Для полноты поглощения аммиака в аппарате ИТН необходимо поддерживать небольшой избыток кислоты (2—3 г/л раствора). Несмотря на

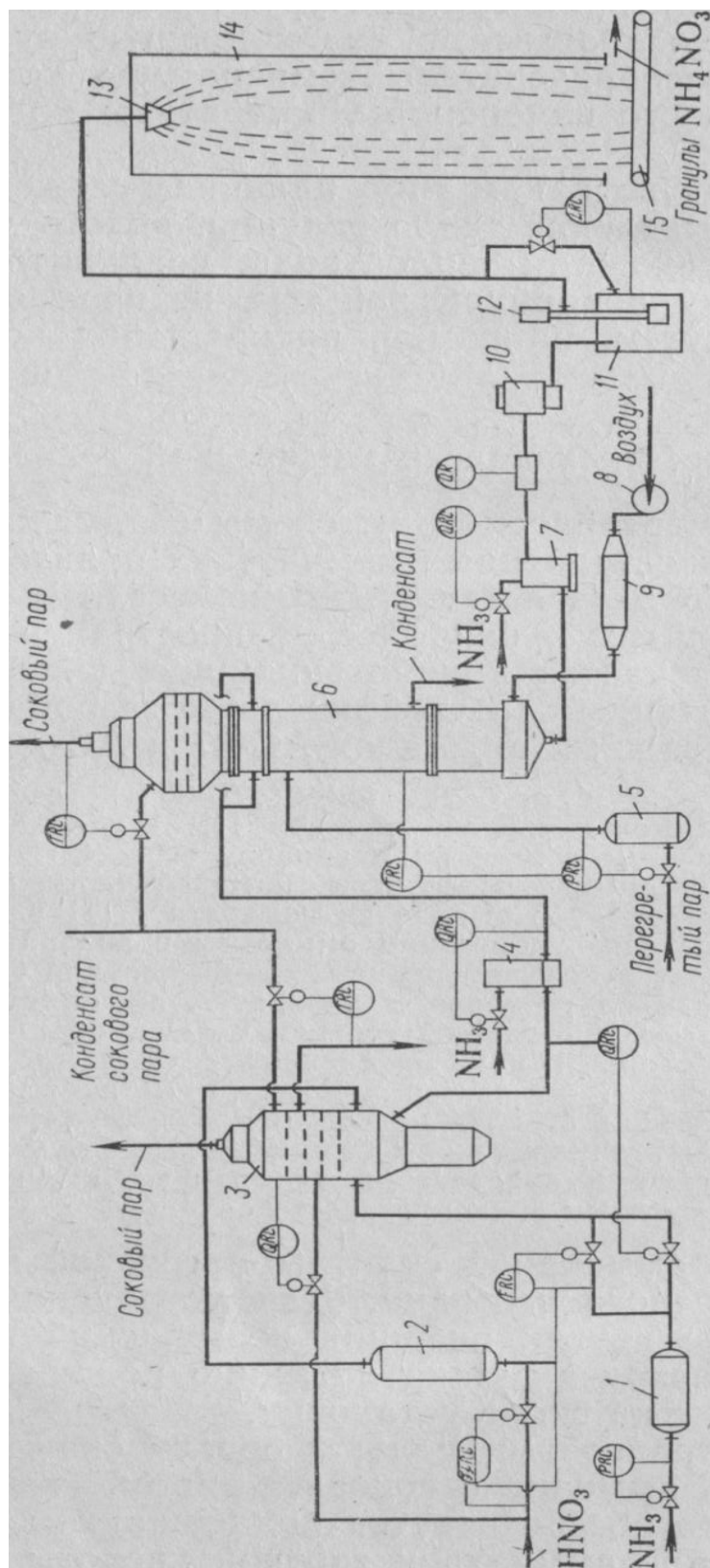


Рис. VII-31. Схема автоматизации производства аммиачной селитры:

1, 2 — подогреватели; 3 — аппарат ИТН; 4 — донейтрализатор; 5 — паровувлажнитель; 6 — выпарной аппарат; 7 — гидрозатвор; 8 — воздуходувка; 9 — воздухоподогреватель; 10 — фильтр плава; 11 — бак плава; 12 — насос для перекачивания плава; 13 — гранулятор; 14 — грануляционная башня; 15 — ленточный транспортер.

это, в соковом паре все же содержится аммиак. Для улавливания его в промывную часть (на вторую тарелку) дополнительно подают азотную кислоту, количество которой регулируется по значению рН конденсата сокового пара. Для более полной очистки сокового пара его конденсат, поступающий на верхнюю тарелку, подают по температуре раствора на выходе со второй тарелки сверху.

Избыточная кислотность среды в аппарате ИТН предопределяет также кислую реакцию раствора аммиачной селитры на выходе из него. Заданное значение рН этого потока поддерживается регулятором рН, корректирующим подачу аммиака в аппарат ИТН. Клапаны регуляторов, управляющих подачей аммиака в аппарат ИТН, смонтированы на параллельных линиях. Избыточная кислотность раствора аммиачной селитры нейтрализуется аммиаком в донейтрализаторе 4, вследствие чего на входе в выпарной аппарат раствор имеет небольшую щелочность, соответствующую содержанию 0,1—0,2 г/л свободного аммиака.

На стадии выпаривания целью регулирования является обеспечение минимального содержания влаги в плаве аммиачной селитры. Для достижения этого поддерживается постоянной (180°C) температура плава на выходе из трубчатой части выпарного аппарата. Регулятор температуры плава корректирует задание стабилизирующему регулятору давления пара, поступающего в межтрубное пространство выпарного аппарата 6 после увлажнителя пара 5. Предусматривается регулирование температуры сокового пара на выходе из аппарата; оно обеспечивается подачей конденсата сокового пара на верхнюю промывную тарелку аппарата.

На выходе из выпарного аппарата плава донейтрализуется аммиаком в гидрозатворе 7 по величине рН плава после гидрозатвора. На этой же линии установлен криоскоп, измеряющий концентрацию плава по температуре начала его кристаллизации.

Равномерность подачи плава на гранулирование обеспечивается регулятором уровня плава в баке 11, управляющим работой клапана, установленного на линии байпасирования части плава с линии нагнетания насоса в бак.

Автоматизация производства бутадиена из бутана. Производство бутадиена из бутана состоит из отделений дегидрирования бутана в бутилены, выделения бутан-бутиленовой фракции и ее разделения, дегидрирования бутиленов в бутадиен, выделения и очистки бутадиена. Ниже рассматриваются схемы автоматизации некоторых из этих отделений.

Дегидрирование бутана в бутилен (рис. VII-32).

Жидкий бутан со склада подают в сепаратор 1, сообщающийся с испарителем 2, обогреваемым водяным паром. Насыщенные пары бутана перегреваются в трубчатой печи 3 и направляются в смонтированный в одном корпусе блок аппаратов «реактор — регенератор». В реакторе 5 в присутствии

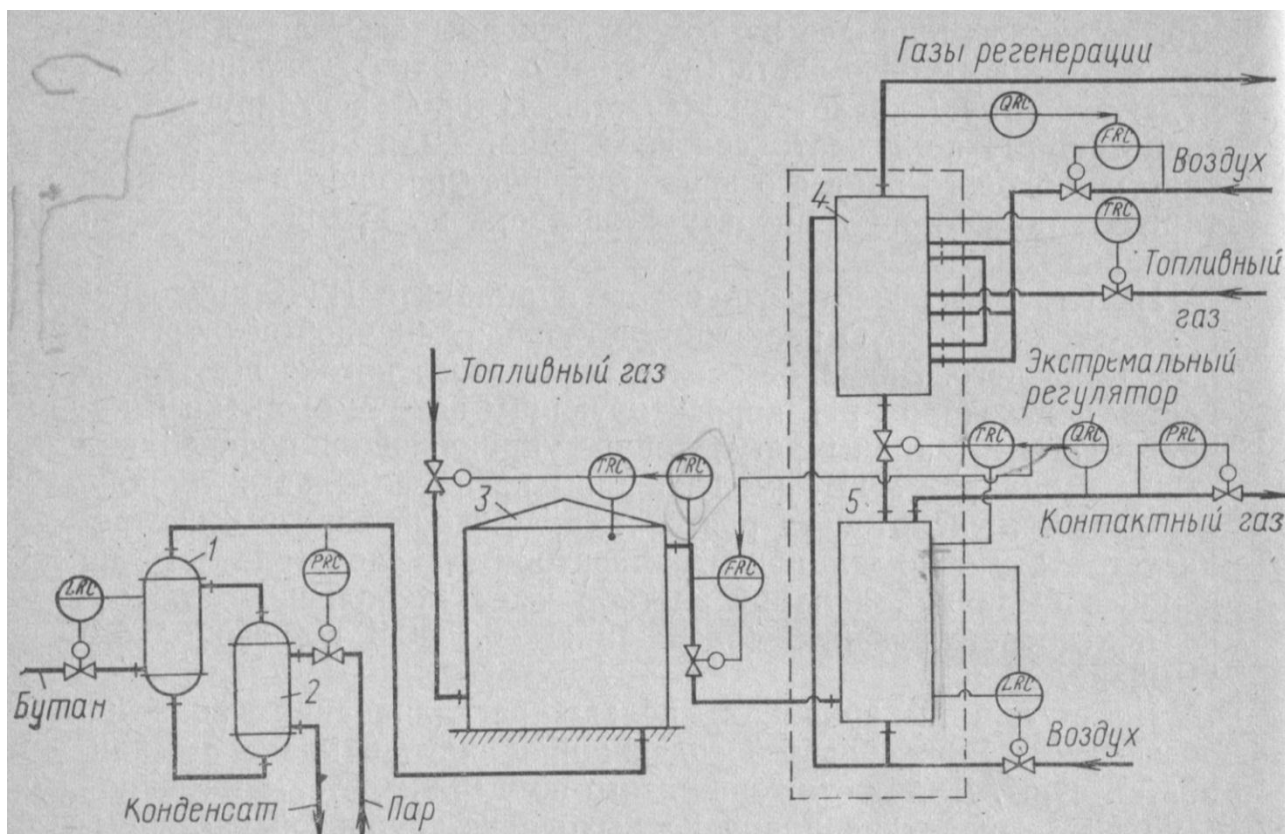


Рис. VII-32. Схема автоматизации отделения дегидрирования бутана в бутилен :

1 — сепаратор; 2 — испаритель; 3 — трубчатая печь; 4 — регенератор; 5 — реактор.

мелкогранулированного катализатора и при высокой температуре бутан дегидрируется в бутилены. Выход бутиленов на исходное сырье не превышает 70%. При этом образуются также метан, водород, углерод, двуокись углерода и другие побочные продукты. Получившаяся при дегидрировании смесь газов выводится из верхней части реактора, охлаждается в холодильниках и котлах-утилизаторах (на схеме не показаны) и направляется на выделение бутан — бутиленовой фракции.

При дегидрировании поверхность гранул катализатора постепенно покрывается коксом и катализатор теряет свою активность. Отработанный катализатор под действием силы тяжести высыпается из реактора, подхватывается потоком воздуха системы пневмотранспорта и перемещается в расположенный выше регенератор 4. В нем при высоких температурах с поверхности гранул катализатора выжигается углерод и активность катализатора восстанавливается. Затем под действием собственного веса гранулы перетекают в реактор. Газы, образующиеся в регенераторе при сжигании топливного газа и углерода, отводятся в атмосферу.

Основная цель процесса дегидрирования бутана, заключается в обеспечении максимально возможного выхода бутиленов в расчете на сырье. Выход бутиленов зависит от состава и расхода исходного сырья, времени контактирования, температуры в зоне реакции, активности катализатора. Основными регулирующими воздействиями являются расходы сырья и контактного газа.

Установлено, что зависимости между содержанием бутиленов в контактном газе и температурой в реакционной зоне, а также расходом перегретых паров, имеют экстремальный

характер. Поэтому для получения максимального выхода бутиленов применяют систему экстремального регулирования. Экстремальный регулятор реагирует на текущее значение содержания бутиленов в контактном газе и корректирует задание двум вспомогательным регуляторам: регулятору расхода перегретых паров бутана и регулятору температуры в реакторе, который воздействует на подачу регенерированного катализатора в зону реакции; в качестве исполнительного устройства применяют регулирующую задвижку с пневматическим приводом.

На время контактирования влияют скорость прохождения паров бутана через зону реакции и уровень катализатора в реакторе 5. Постоянство скорости паров может быть обеспечена лишь при определенном значении перепада давления в газовой линии. Постоянство перепада поддерживается путем стабилизации давлений в начале и в конце этой линии с помощью отдельных регуляторов давления. Регулятор, установленный в начале газовой линии, воздействует на подачу греющего пара в испаритель 2, а регулятор, установленный в ее конце, — на отвод контактного газа из системы. Заданное значение уровня катализатора поддерживается регулятором, управляющим подачей воздуха в систему пневмотранспорта.

Температура в зоне реакции зависит от температуры сырья, подаваемого в реактор. Поэтому для регулирования температуры паров бутана на выходе из трубчатой печи 3 применяют каскадную АСР, которая изменяет подачу топливного газа в печь.

Активность регенерированного катализатора определяется количеством углерода, осевшего на поверхности его гранул. Для выжигания этого углерода в несколько зон по высоте регенератора 4 подают топливный газ и воздух. Температура в регенераторе, характеризующая интенсивность сгорания углерода, стабилизируется регулятором, управляющим подачей топливного газа. Полнота сгорания определяется по составу газов регенерации и содержанию в них горючих компонентов. Поддержание постоянства состава газов регенерации обеспечивается двухконтурной каскадной системой регулирования со стабилизирующим регулятором подачи воздуха в регенератор и корректирующим регулятором состава газов.

Материальный баланс установки поддерживается регулятором уровня в сепараторе 1.

Дегидрирование бутиленов в бутадиен (рис. VII-33).

При дегидрировании бутиленов в реакторе с неподвижным слоем катализатора насыщенные пары бутиленов, вышедших из испарителя 7, и водяного пара перегреваются в трубчатой печи 2 до 630 °С; при их вводе в реактор 3 они смешиваются в мольном соотношении 1 : 20. При их прохождении через слой катализатора образуется контактный газ, содержащий бутадиен. После закалки и понижения температуры в котле-утилизаторе 4 до 250 °С контактный газ направляется на выделение бутилен — бутадиеновой фракции.

В рассматриваемом отделении автоматизируются (см. гл. VI) операции переключения реакторов с одного режима работы на другой, а также процессы дегидрирования бутиленов и регенерации катализатора. Задвижки, работающие от командного прибора, установлены на линиях подачи в реактор

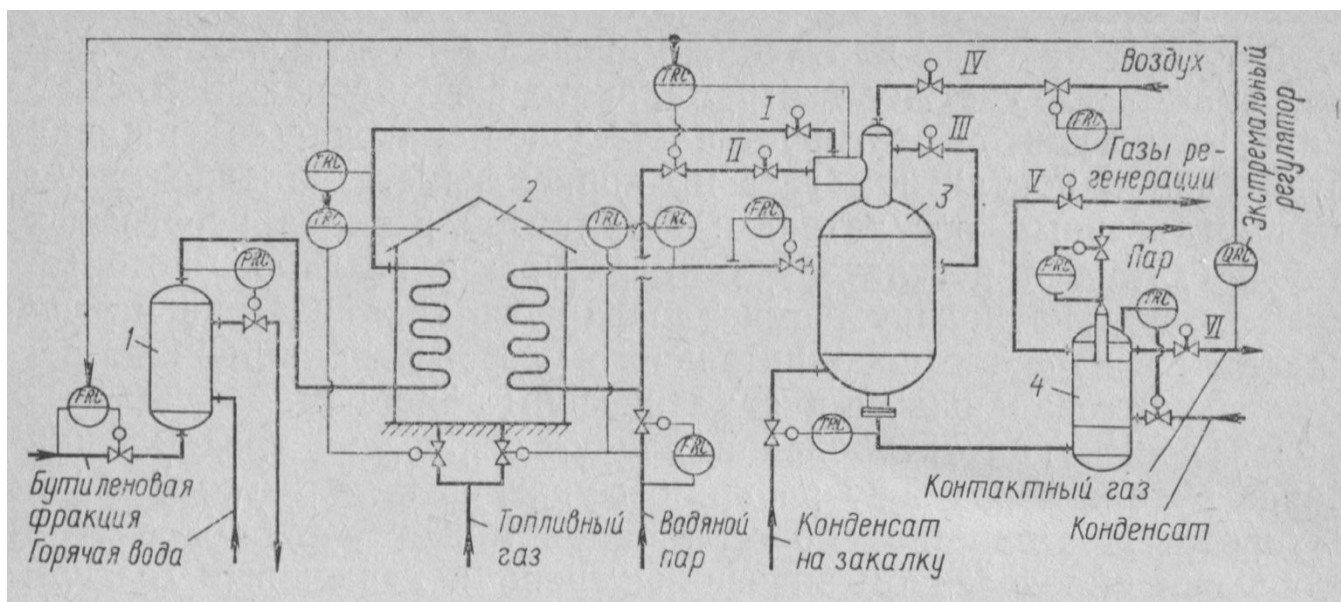


Рис. VII-33. Схема автоматизации отделения дегидрирования бутилена в бутадиен:

1 — испаритель; 2 — трубчатая печь; 3 — реактор; 4 — котел-утилизатор, задвижки на линиях: I — ввода бутиленовой фракции; II — водяного пара на контактирование; III — пара на продувку и регенерацию; IV — воздуха на регенерацию; V — отвода газов регенерации; VI — отвода контактного газа.

бутиленовой фракции (I), водяного пара на контактирование (II), пара на продувку и регенерацию (III), воздуха на регенерацию (IV), а также на линиях отвода газов регенерации (V) и контактного газа (VI).

При контактировании задвижки I, II, VI должны быть открыты, а задвижки III, IV, V — закрыты. Для продувки реактора паром задвижки I, II, VI закрываются, а задвижки III, V открываются. Затем открывается задвижка IV и катализатор регенерируется. После этого задвижка IV закрывается и реактор еще раз продувается паром. Затем задвижки I, II, VI открываются, а задвижки III, V закрываются, и реактор снова начинает работать в режиме контактирования.

Стабилизация времени контактирования смеси исходных паров с катализатором обеспечивается поддержанием постоянства давления паров бутилена на входе в трубчатую печь. Температуры перегретых паров бутилена и водяного пара поддерживаются каскадными системами регулирования температуры над перевальной стенкой трубчатой печи с корректировкой по температуре продукта на выходе из печи. Эти системы управляют клапанами, установленными на линиях подачи топливного газа в печь.

Процесс дегидрирования характеризуется экстремальной зависимостью содержания бутадиена в контактном газе от температуры и подачи бутиленов в реактор. При этом для обеспечения максимального выхода бутадиена 33% (масс.) в расчете на пропущенные бутилены необходим экстремальный регулятор, корректирующий задание регуляторов температуры в реакторе и расхода бутадиенов. Температура в реакторе определяется температурой смеси перегретых бутиленов и водяного пара,

поступающей на дегидрирование. Температуру этой смеси поддерживают разбавлением насыщенным водяным паром.

Закалка контактного газа на выходе из реактора до температуры 530 °С, проводимая с целью предотвращения вторичных реакций термического разложения углеводородов, осуществляется регулятором температуры, воздействующим на клапан, через который в реактор впрыскивается конденсат. Температура контактного газа на выходе из котла-утилизатора поддерживается на заданном значении регулятором температуры, клапан которого установлен на линии подвода конденсата к котлу. Образовавшийся пар отводится из котла-утилизатора по сигналу давления.

Постоянство подачи воздуха и пара, регенерирующих катализатор, стабилизируется отдельными регуляторами расхода.

7. Автоматизированные системы управления технологическими процессами

АСУ ТП предназначены для оперативного управления технологическими процессами, а также для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект в соответствии с принятым критерием управления. На нижнем уровне АСУ ТП решают задачи стабилизации технологических величин, на верхнем — задачи оптимизации технологических режимов.

Современные АСУ ТП — это человеко-машинные системы, и человеку отводится в них существенная роль. Функции, возлагаемые на человека в этих системах, более сложны и ответственны, чем при использовании обычных систем автоматизации.

В АСУ ТП технические средства решают задачи по известному алгоритму; на человека же возлагается нахождение решения более сложных задач (случай недостаточной априорной информации, множественности решений и др.). С усложнением задач, решаемых системой, его роль еще более возрастает.

Для эффективного сочетания работы человека и технических средств необходимо максимально согласовать функциональные характеристики технических средств и физиологические возможности человека. Необоснованный или случайный выбор задач контроля и управления по объему и номенклатуре приводит к некачественному решению человеком некоторых из поставленных перед ним задач. При этом резко повышается вероятность ошибочных действий и снижается скорость решения задач.

АСУ ТП классифицируют в зависимости от типа объекта управления (непрерывный, дискретный и др.), а также от числа контролируемых технологических величин и функций, реализуемых системой.

Совместно с технологическим объектом управления (ТОУ) АСУ ТП составляет автоматизированный технологический комплекс (АТК). На рис. VII-34 показана функциональная схема

АТК, в которой отражены основные связи между ТОУ, технологами-операторами, осуществляющими управление технологическим процессом и техническими средствами. По выполняемым функциям последние можно разделить на информационную и управляющую подсистемы.

Информационная подсистема обеспечивает выполнение информационных функций, которые позволяют следить за технологическим процессом. К ним относятся:

- сбор, первичная обработка и хранение текущей информации о протекании технологического процесса и состоянии основных видов оборудования;

- вычисление текущих значений технологических и технико-экономических показателей, характеризующих качество процесса;

- периодическая регистрация текущих значений измеряемых и вычисляемых показателей процесса;

- индикация или регистрация технологических величин по вызову технолога-оператора;

- информирование технолога-оператора о приближении пред-аварийных и аварийных ситуаций и о выходе показателей процесса за допустимые пределы;

- обмен информацией с вышестоящей системой управления.

Управляющая подсистема предназначена для выработки и реализации управляющих воздействий. Для этого используются:

- автоматическое одноконтурное регулирование отдельных величин технологического процесса; многоконтурное регулирование;

- оптимальное управление ТОУ в целом или отдельными аппаратами в установившемся и неуставившемся режимах работы;

- выполнение логических и программных операций дискретного управления (дискретное управление исполнительными органами, аварийные блокировки, пуск и останов отдельных аппаратов или машин и др.).

Необязательно, чтобы в каждой конкретной АСУ ТП были реализованы все эти функции. Некоторые из них неприменимы для данного технологического объекта; выполнение же других бывает целесообразно возложить на АСУП.

В АСУ ТП управляющая подсистема может работать по нескольким вариантам (рис. VII-35). При использовании АСУ ТП для выдачи оператору рекомендаций по управлению технологическим процессом, зависящих от установленных критериев и ограничений, она выдает несколько решений по управлению процессом. Анализируя текущую информацию оператор либо выбирает одно из них, либо отвергает их все и принимает решение на основе предыдущего опыта. Через пульт контроля и управления (ПКУ) оператор ведет управление процессом

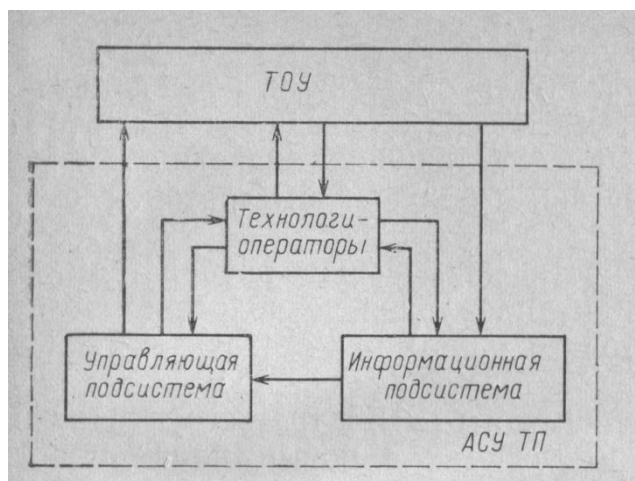


Рис. VII-34. Функциональная схема АТК.

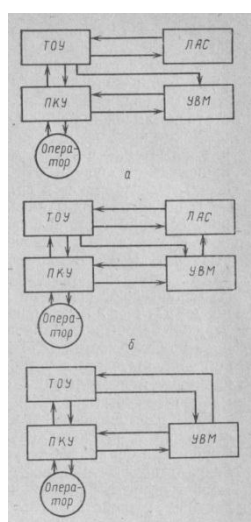


Рис. VII-35. Схема распределения функций управления в АСУ ТП:

а — при работе в информационно-советующем режиме; б — при управлении через ЛАС;
в — в режиме непосредственного цифрового управления.

(рис. VII-35,а). При этом сигнализация о нарушении процесса, его защита, блокировка и автоматическое регулирование обеспечиваются посредством локальных автоматических систем (ЛАС).

АСУ ТП, работающую в таком режиме, называют информационно-советующей.

В более совершенных АСУ ТП необходимые управляющие воздействия рассчитываются управляющей вычислительной машиной (УВМ) и подаются в качестве заданных значений на ЛАС (рис. VII-36, б), т. е. АСУ ТП управляет процессом через ЛАС. При нарушениях в работе УВМ. или других необходимых случаях, обслуживающий персонал может вмешиваться в процесс управления и АСУ ТП будет работать в предыдущем режиме.

Возможен также вариант работы АСУ ТП в режиме непосредственного цифрового управления, при котором УВМ, обязательно обладающая высокой степенью надежности, непосредственно воздействует на ТОУ через исполнительные устройства (рис. VII-35, в). В этом случае АСУ ТП не снабжается ЛАС.

В информационной и управляющей подсистемах обязательно используются средства вычислительной техники, посредством которых в соответствии с математическим описанием и критерием управления проводится расчет текущих значений оптимальных управляющих воздействий с большой быстротой и достаточно высокой точностью.

В химической промышленности наибольшее распространение в системах автоматизации и управления технологическими процессами получили ЭВМ второго поколения М-6000, М-7000, серии «Электроника» и др.

В последние годы начали применять ЭВМ третьего поколения, созданные на интегральных схемах с повышенной плотностью монтажа и микропрограммным управлением. К таким вычислительным машинам относятся системы малых (СМ) ЭВМ.

В настоящее время на их основе разработаны управляющие вычислительные комплексы (УВК). Они содержат базовый ряд процессоров различных модификаций и производительностей (СМ-1, СМ-2, СМ-3, СМ-4) и широкий набор дополнительных устройств, построенных по модульному принципу и позволяющих строить многопроцессорные и многомашинные системы.

УВК состоят из центральной части и системы устройств сопряжения с объектом (УСО). Центральная часть, предназначенная для обработки текущей информации и выработки управляющих воздействий, состоит из процессора, устройства оперативной памяти, внешней памяти на магнитных дисках, перфолентных устройств, дисплеев. Производительность процессора составляет около 100 000 микроопераций в секунду. Система УСО, предназначенная для согласования сигналов измерительных преобразователей и исполнительных устройств с центральной частью комплекса, позволяет осуществлять дистанционный сбор информации, а также передачу управляющих воздействий на объект.

Управляющие вычислительные комплексы имеют развитое программное обеспечение, с помощью которого осуществляется управление работой центральной части и системы УСО, а также переработка информации об объекте и формирование управляющих воздействий. УВК снабжены развитыми системами ввода—вывода данных, удобной для программирования системой команд, системой приоритетного прерывания, позволяющей совмещать счет с выполнением операций ввода — вывода. Они обладают достаточно высокими техническими характеристиками и надежностью, просты и удобны в обслуживании.

Применение ЭВМ в схемах автоматизации технологических процессов позволяет решать задачи оптимального управления путем обработки текущей статистической информации. При этом рассчитываются текущие и оптимальные значения, характерных величин процесса неизмеряемых непосредственно; при

отклонении текущих значений от оптимальных вырабатываются новые задания локальным автоматическим регуляторам с целью поддержания процесса на оптимальном уровне.

8. Экономическая эффективность систем автоматизации

Автоматизация производства позволяет уменьшить эксплуатационные затраты, увеличить объем выпускаемой продукции, повысить производительность труда, снизить (на 30—40%) трудоемкость получения продукта.

В химических производствах автоматизация экономически целесообразна благодаря непрерывности технологических процессов, крупным масштабам производства, возможности достижения оптимальных режимов в условиях изменяющихся характеристик оборудования и параметров процесса, а также вследствие все возрастающих потребностей народного хозяйства в продуктах химической технологии.

Укрупнение производств, увеличение единичной мощности агрегатов и основных видов важнейшего технологического оборудования увеличивают ответственность, возлагаемую на контроль и управление их работой.

Дальнейшее внедрение прогрессивных решений по компоновке технологического оборудования и его размещению на открытых площадках возможно лишь при автоматизации, так как вынос оборудования на наружные площадки предполагает обязательный автоматический контроль и управление технологическим процессом.

Удельный вес затрат на автоматизацию обычно составляет 15—20% стоимости основного оборудования химических предприятий. При этом объединение отдельных производственных цехов и установок в общие комплексы с соответствующим сокращением инженерных сетей и других вспомогательных сооружений удешевляет автоматизацию, так как используются общие помещения для щитов, уменьшается длина трасс коммуникаций средств автоматизации, облегчается обслуживание последних.

Основными показателями экономической эффективности автоматизации являются срок окупаемости капитальных вложений и коэффициент экономической эффективности.

Срок окупаемости определяют по уравнению:

$$T_{ок} = (K + A)/\mathcal{E}$$

где $T_{ок}$ — срок окупаемости, год; K — капитальные вложения (затраты) на внедрение автоматизации, руб.; A — амортизационные отчисления от стоимости вновь введенного оборудования, руб.; $\mathcal{E}$ — условно-годовой экономический эффект, руб/год, определяемый по равенству

$$\mathcal{E} = (C_1 - C_2)B$$

C_1 C_2 —себестоимость единицы продукции до и после автоматизации, руб.;
 V — годовой выпуск продукции после автоматизации, единица продукции.

Коэффициент экономической эффективности капиталовложений на автоматизацию E (год⁻¹), используют для определения экономической эффективности тех мероприятий, которые оказывают влияние на показатели всего завода; его находят по уравнению:

$$E = (C_1 - C_2)V/K$$

Для различных отраслей народного хозяйства установлены нормативный срок окупаемости T_n , и нормативный коэффициент экономической эффективности E_n . Рассчитанные срок окупаемости и коэффициент эффективности сравнивают с установленными для данной отрасли промышленности нормативными величинами T_n и E_n , и на основании этого делают вывод об эффективности автоматизации.

Показатели экономической эффективности автоматизации могут быть улучшены за счет повышения технико-экономических показателей производства. На последние влияют себестоимость продукции, ее годовой выпуск, капитальные затраты.

В химической промышленности себестоимость продукции определяется в основном стоимостью сырья (50—70%), а также затратами на вспомогательные материалы, энергию и заработную плату. Поэтому для повышения экономической эффективности, при разработке автоматизации усилия в первую очередь должны быть направлены на уменьшение расходов по этим статьям.

Экономия капитальных затрат может быть достигнута за счет уменьшения числа единиц однотипного технологического оборудования с одновременным повышением его производительности; числа промежуточных емкостей, в которых накапливаются и смешиваются продукты; числа приборов и регуляторов (переход к использованию систем централизованного контроля и управления) и т. д.

Увеличение годового выпуска продукции может быть обеспечено в результате интенсификации технологических процессов, увеличении объема производства, повышения производительности труда.

При оценке эффективности автоматизации следует учитывать и проводимые на ее основе мероприятия по обеспечению безопасности труда, повышению культуры производства, улучшению условий труда, поскольку в конечном счете эти мероприятия также влияют на показатели эффективности автоматизации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Оригиналы и изображения функций по Лапласу

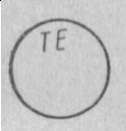
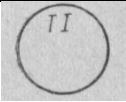
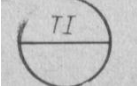
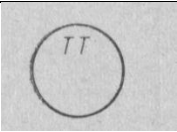
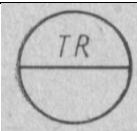
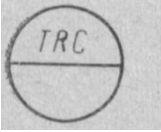
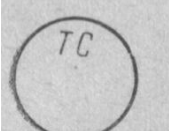
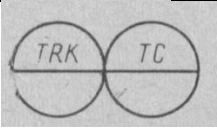
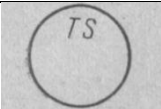
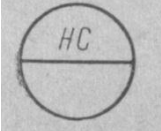
Номер формулы	Оригинал*	Изображение
1	$f(t)$	$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$
2	$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{q-i\infty}^{q+i\infty} F(p) e^{pt} dp$	$F(p)$
3	$af(t)$	$aF(p)$
4	$af_1(t) + bf_2(t)$	$aF_1(p) + bF_2(p)$
5	$\frac{df(t)}{dt}$	$pF(p) - f(0)$
6	$\frac{d^n f(t)}{dt^n}$	$p^n F(p) - \sum_{k=1}^n \frac{d^{k-1} f(0)}{dt^{k-1}} p^{n-k}$ $\frac{d^0 f(0)}{dt^0} = f(0)$
7	$\int f(t) dt$	$\frac{F(p)}{p} + \frac{1}{p} \int f(0) dt$
8	$\underbrace{\int \int \dots \int}_n f(t) dt$	$\frac{F(p)}{p^n} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{p^{n-k+1}} \underbrace{\int \int \dots \int}_k f(0) dt$
9	$f\left(\frac{t}{a}\right)$	$aF(ap)$
10	$\int_0^t f_1(t-\tau) f_2(\tau) d\tau$	$F_1(p) \cdot F_2(p)$
11	$f(t-a)$ $f = (t-a) = 0$ при $0 < t < a$	$e^{-ap} F(p)$
12	$f(t+a)$ $f(t+a) = 0$ при $-a < t < 0$	$e^{ap} F(p)$
13	$\frac{\partial}{\partial a} f(t, a)$	$\frac{\partial}{\partial a} F(p, a)$
14	$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pF(p)$	
15	$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} pF(p)$	

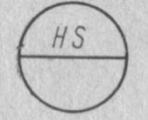
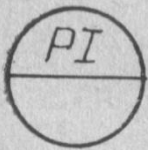
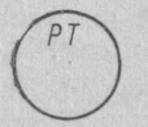
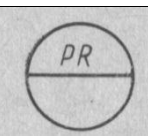
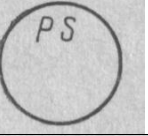
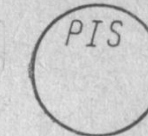
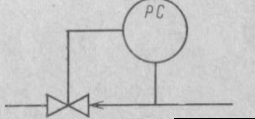
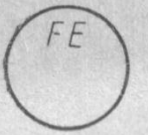
Номер формулы	Оригинал*	Изображение
16	$1(t)$	$\frac{1}{p}$
17	$\delta(t)$	1
18	t	$\frac{1}{p^2}$
19	t^n (n —целое положительное число)	$\frac{n!}{p^{n+1}}$
20	e^{-at}	$\frac{1}{p+a}$
21	e^{-iat}	$\frac{1}{p+ia}$
22	e^{iat}	$\frac{1}{p-ia}$
23	$\sin at$	$\frac{a}{p^2+a^2}$
24	$\cos at$	$\frac{p}{p^2+a^2}$
25	$\operatorname{sh} at$	$\frac{a}{p^2-a^2}$
26	$\operatorname{ch} at$	$\frac{p}{p^2-a^2}$
27	$1 - e^{-at}$	$\frac{a}{p(p+a)}$
28	$\frac{e^{-at} - e^{-bt}}{b-a}$	$\frac{1}{(p+a)(p+b)}$
29	te^{-at}	$\frac{1}{(p+a)^2}$
30	$[e^{-at}(1-at)]$	$\frac{p}{(p+a)^2}$
31	$\frac{1}{b} e^{-at} \sin bt$	$\frac{1}{(p+a)^2+b^2}$
32	$e^{-at} \cos bt$	$\frac{p+a}{(p+a)^2+b^2}$
33	$\frac{1}{a-b} (ae^{at} - be^{bt})$	$\frac{p}{(p-a)(p-b)}$
34	$1 - \cos at$	$\frac{a^2}{p(p^2+a^2)}$

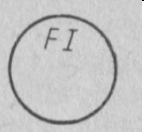
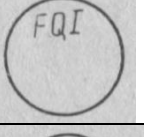
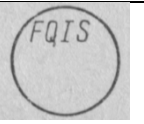
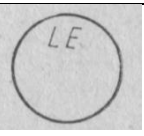
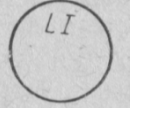
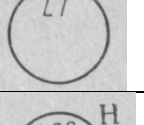
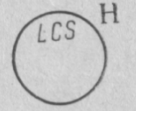
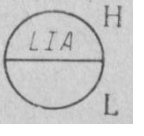
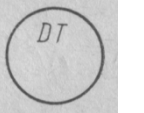
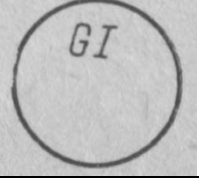
Номер формулы	Оригинал*	Изображение
35	$e^{-at} + at - 1$	$\frac{a^2}{p^2 (p + a)}$
36	$1 - \left(1 + \frac{t}{a}\right)e^{-t/a}$	$\frac{1}{p (ap + 1)^2}$
37	$at - ab (1 - e^{-t/b})$	$\frac{a}{p^2 (bp + 1)}$
38	$1 + \frac{1}{a - b} (ae^{at} - be^{bt})$	$\frac{ab}{p (p - a) (p - b)}$
39	$t \sin at$	$\frac{2ap}{(p^2 + a^2)^2}$
40	$t \cos at$	$\frac{p^2 - a^2}{(p^2 + a^2)^2}$
41	$te^{-at} \sin bt$	$\frac{2 (p + a) b}{[(p + a)^2 + b^2]^2}$
42	$te^{-at} \cos bt$	$\frac{(p + a)^2 - b^2}{[(p + a)^2 + b^2]^2}$
43	$\frac{1}{(n - 1)!} t^{n-1} e^{-at}$ n — целое положительное число)	$\frac{1}{(p + a)^n}$
44	0 при $0 < t < a$ $1 - e^{-b(t-a)}$ при $a < t$	$\frac{be^{-ap}}{p (p + b)}$

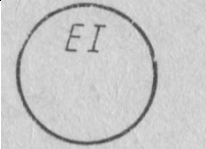
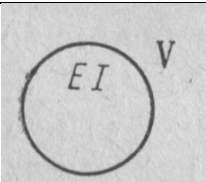
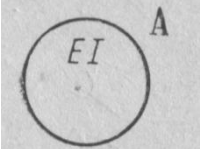
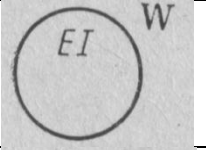
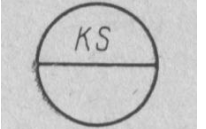
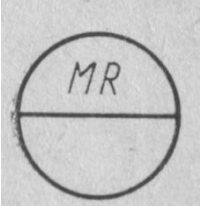
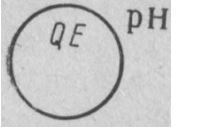
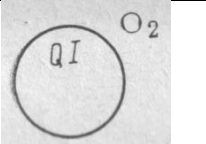
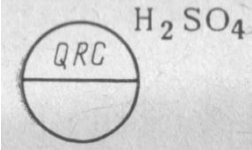
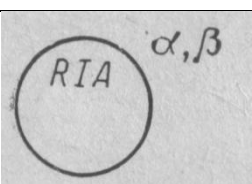
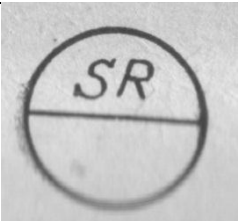
* a и b — постоянные или переменные, не зависящие от t и p .

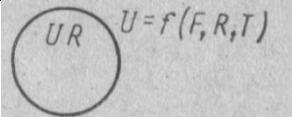
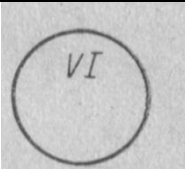
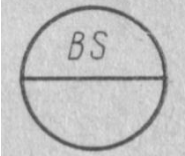
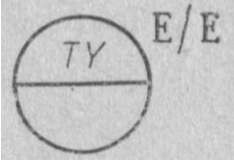
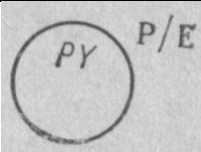
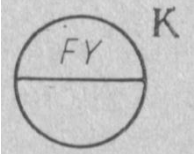
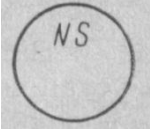
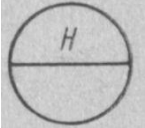
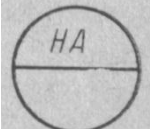
ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Примеры построения условных обозначений	
1. Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения температуры, установленный по месту (термометр термоэлектрический, термометр сопротивления, термобаллон манометрического термометра и т. п.)	
2. Прибор для измерения температуры показывающий, установленный по месту (термометр ртутный, термометр манометрический и т. п.)	
3. Прибор для измерения температуры показывающий, установленный на щите (милливольтметр, логометр, потенциометр, мост автоматический и т. п.)	
4. Прибор для измерения температуры бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту (термометр манометрический бесшкальный с пневмо- или электропередачей)	
5. Прибор для измерения температуры одноточечный, регистрирующий, установленный на щите (милливольтметр самопишущий, логометр, потенциометр, мост автоматический и т. п.)	
6. Прибор для измерения температуры с автоматическим обегавшим устройством, регистрирующий, установленный на щите (потенциометр многоточечный самопишущий, мост автоматический и т. п.)	
7. Прибор для измерения температуры регистрирующий, установленный на щите (термометр манометрический, милливольтметр, логометр, потенциометр, мост автоматический и т. п.)	
8. Регулятор температуры, бесшкальный, установленный по месту (например, дилатометрический регулятор температуры)	
Комплект для измерения температуры, регистрирующий, регулирующий, снабженный станцией управления, установленный на щите (например, вторичный прибор и регулирующий блок системы «Старт»)	
10. Прибор для измерения температуры бесшкальный, с контактным устройством, установленный по месту (например, реле температурное)	
11. Байпасная панель дистанционного управления, установленная на щите	

12. Переключатель электрических цепей измерения (управления), переключатель для газовых (воздушных) линий, установленный на щите		
13. Прибор для измерения давления (разрежения) показывающий, установленный по месту (любой показывающий манометр, дифманометр, тягомер, напорометр, вакуумметр и т. п.)		
14. Прибор для измерения перепада давления показывающий, установленный по месту (например, дифманометр показывающий)		
15. Прибор для измерения давления (разрежения), бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту (например, манометр, дифманометр бесшкальный с пневмо- или электропередачей)		
16. Прибор для измерения давления (разрежения) регистрирующий, установленный на щите (например, манометр самопишущий или любой вторичный прибор для регистрации давления)		
17. Прибор для измерения давления с контактным устройством, установленный по месту (например, реле давления)		
18. Прибор для измерения давления (разрежения) показывающий с контактным устройством, установленный по месту (электроконтактный манометр, вакуумметр и т. п.).		
19. Регулятор давления «до себя», работающий без использования постороннего источника энергии (регулятор давления прямого действия)		
20. Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения расхода, установленный по месту (диафрагма, сопло, труба Вентури и т. п.)		
21. Прибор для измерения расхода бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту (например, бесшкальный дифманометр или ротаметр с пневмо- или электропередачей)		
22. Прибор для измерения соотношения расходов регистрирующий, установленный на щите (любой вторичный прибор для регистрации соотношения расходов)		

23. Прибор для измерения расхода показывающий, установленный по месту (например, дифманометр или ротаметр показывающий).	
24. Прибор для измерения расхода интегрирующий, установленный по месту (любой бесшкальный счетчик-расходомер с интегратором)	
25. Прибор для измерения расхода показывающий, интегрирующий, установленный по месту (например, показывающий дифманометр с интегратором)	
26. Прибор для измерения расхода интегрирующий, с устройством для выдачи сигнала после прохождения заданного количества вещества, установленный по месту (например, счетчик-дозатор)	
27. Первичный измерительный преобразователь для измерения уровня, установленный по месту (например, чувствительный элемент емкостного уровнемера)	
28. Прибор для измерения уровня показывающий, установленный по месту (например, манометр или дифманометр, используемый для измерения уровня)	
29. Прибор для измерения уровня с контактным устройством, установленный по месту (например, реле уровня)	
30. Прибор для измерения уровня бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту	
31. Прибор для измерения уровня бесшкальный, регулирующий, с контактным устройством, установленный по месту (например, электрический регулятор-сигнализатор уровня; буква H в данном примере означает блокировку по верхнему уровню)	
32. Прибор для измерения уровня показывающий с контактным устройством, установленный на щите (например, вторичный показывающий прибор с сигнальным устройством; буквы Я и L означают сигнализацию верхнего и нижнего уровней).	
33. Прибор для измерения плотности раствора бесшкальный, с дистанционной передачей показаний, установленный по месту.	
34. Прибор для измерения размеров показывающий, установленный по месту (например, показывающий прибор для измерения толщины стальной ленты)	

35. Прибор для измерения любой электрической величины показывающий, установленный по месту (надписи, расшифровывающие конкретную измеряемую электрическую величину, располагаются либо рядом с прибором, либо в виде таблицы на поле чертежа)	
36. Вольтметр.	
37. Амперметр	
38. Ваттметр	
39. Прибор для управления процессом по временной программе, установленный на щите (командный электропневматический прибор КЭП, многоцепное реле времени и т. п.)	
40. Прибор для измерения влажности регистрирующий, установленный на щите	
41. Первичный измерительный преобразователь для измерения качества продукта, установленный по месту (например, чувствительный элемент рН-метра)	
42. Прибор для измерения качества продукта показывающий, установленный по месту (например, газоанализатор показывающий для контроля содержания кислорода в дымовых газах)	
43. Прибор для измерения качества продукта регистрирующий, регулирующий, установленный на щите (например, вторичный самопишущий прибор регулятора концентрации серной кислоты в растворе)	
44. Прибор для измерения радиоактивности показывающий, с контактным устройством, установленный по месту (например, прибор для показания и сигнализации предельно допустимых концентраций α - и β -лучей)	
45. Прибор для измерения частоты вращения привода регистрирующий, установленный на щите (например, вторичный прибор тахогенератора)	

46. Прибор для измерения нескольких разнородных величин регистрирующий, установленный по месту (например, самопишущий дифманометр-расходомер с дополнительной записью давления и температуры пара; надпись, расшифровывающая измеряемые величины, наносится либо справа от прибора, либо на поле схемы в примечании)	
47. Прибор для измерения вязкости раствора, показывающий, установленный по месту.	
48. Прибор для измерения массы продукта показывающий, с контактным устройством, установленный по месту (например, устройство электронно-тензометрическое или сигнализирующее)	
49. Прибор для контроля погасания факела в печи бесшкальный с контактным устройством, установленный на щите (например, вторичный прибор запально-защитного устройства; применение резервной буквы В должно быть оговорено на поле схемы)	
50. Преобразователь сигнала, установленный на щите (входной и выходной сигналы электрические; - например, преобразователь измерительный, служащий для преобразования ТЭДС термоэлектрического термометра в сигнал постоянного тока .	
51. Преобразователь сигнала, установленный по месту (входной сигнал пневматический, выходной — электрический)	
52. Вычислительное устройство, выполняющее функцию умножения на постоянный коэффициент К.	
53. Пусковая аппаратура для управления электродвигателем (например, магнитный пускатель, контактор и т. п.; применение резервной буквы N должно быть оговорено на поле схемы)	
54. Аппаратура для ручного дистанционного управления, установленная на щите (кнопка, ключ управления, задатчик и т. п.).	
55. То же, снабженная устройством для сигнализации (кнопка со встроенной лампочкой, ключ управления с подсветкой и т. п.).	
56. Ключ управления, установленный на щите (случай, когда позиционное обозначение велико и потому наносится вне окружности)	