



В.С. Балакирев, А.Э. Софиев

Применение средств пневмо- и гидроавтоматики в химических производствах

Издание второе, переработанное и
дополненное

*Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР в качестве
учебного пособия для студентов вузов, обу-
чающихся по специальности «Автоматизация и
комплексная механизация химико-технологи-
ческих процессов»*



Москва
«ХИМИЯ»
1984

6П.7

Бал20

УДК 66.01-52(075.8)

Балакирев В. С., Софиев А. Э.

Применение средств пневмо- и гидроавтоматики в химических производствах: Учебное пособие для вузов.— 2-е изд. перераб. и доп.— М.: Химия, 1984. — 192 с., ил.

Второе издание (1-е вышло в 1973 г.) переработано и дополнено описанием новых элементов, устройств и систем управления. Описаны принцип действия и конструктивное оформление основных элементов и устройств пневмо- и гидроавтоматики, приведены их статические и динамические характеристики, показатели надежности и ремонтпригодности. Рассмотрены комбинированные электронно-пневматические, электрогидравлические устройства и регуляторы. Приведены примеры промышленных систем пневмоавтоматики.

Является учебным пособием по курсу «Элементы и системы гидро- и пневмоавтоматики» (специальность 0639).

192 с., 6 табл., 112 рис., 5 литературных ссылок.

Рецензент: д. т. н., проф. **ОБНОВЛЕНСКИЙ П. А.**

Редактор Р. Е. Миневич
Художник А. Я. Михайлов
Художественный редактор Н. В. Носов
Технический редактор В. М. Скитина
Корректор Н. А. Иванова

ИБ № 1506

Сдано в набор 01.11.83. Подп. в печ. 04.01.84. Формат бумаги 84×108^{1/32}.
Бумага тип. № 3. Гарн. литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,08.
Усл. хр.-отт. 10,29. Уч.-изд. л. 10,86. Тираж 5200 экз. Заказ № 1191.
Цена 40 к. Изд. № 2486.

Ордена «Знак Почета» издательство «Химия»,
107076, Москва, Стромынка, 13.

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома при Государственном
комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли
Москва, 103051, Цветной бульвар, 26.

Б 2801020000-065 65.84
050(01)-84

© Издательство «Химия», 1984 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Предисловие</i>	4
<i>Введение</i>	6
Глава 1. Средства пневмоавтоматики	10
1.1. Простые элементы	10
1.2. Составные элементы и устройства	23
1.3. Дискретные элементы и узлы	42
1.4. Пневматические регуляторы и приборы агрегатной унифицированной системы (АУС)	50
1.5. Элементы УСЭИПА и пневматические регуляторы системы «Старт»	58
1.6. Элементы струйной и струйно-мембранной техники	77
1.7. Пневматические исполнительные механизмы	83
Глава 2. Средства гидроавтоматики	86
2.1. Элементы гидроавтоматики	87
2.2. Гидравлические регуляторы и исполнительные механизмы	94
2.3. Комбинированные электронно-гидравлические регуляторы	99
Глава 3. Надежность средств пневмо- и гидроавтоматики	107
3.1. Надежность элементов	107
3.2. Надежность систем	123
3.3. Характеристики восстановления систем	129
3.4. Эффективность сложных систем	131
3.5. Исследование надежности элементов и систем пневмо- и гидроавтоматики	136
Глава 4. Системы пневмоавтоматики для химических производств	145
4.1. Принципы построения пневматических систем управления	145
4.2. Построение пневматических АСР	150
4.3. Применение пневмоавтоматики в АСУ ТП	160
4.4. Промышленные системы пневмоавтоматики	165
Приложения	183
1. Перечень серийно выпускаемых средств пневмоавтоматики	183
2. Система питания сжатым воздухом пневматических приборов	188
3. Встроенные пневматические регуляторы	189
<i>Литература</i>	193

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пневматические устройства, приборы и регуляторы нашли широкое применение в химической, нефтеперерабатывающей, газодобывающей и ряде других отраслей промышленности. Это объясняется пожаро- и взрывобезопасностью средств пневмоавтоматики, достаточно высокой надежностью и простотой эксплуатации, относительно невысокой стоимостью и т. п.

В последние годы пневматические средства применяют не только при создании отдельных автоматических систем регулирования (АСР), но и при реализации достаточно сложных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП). При этом следует признать, что широкое распространение АСУТП, базирующихся на ЭВМ, и интенсивное внедрение микропроцессорной техники привели к определенному перераспределению удельных весов электронных и пневматических средств автоматизации в пользу первых. Так, по данным ряда американских фирм, за период с 1970 по 1980 год доля пневматических средств автоматизации сократилась в среднем по всем отраслям (кроме химической и нефтегазовой) с 60 до 40%; вместе с тем в химической и нефтегазовой отраслях промышленности они продолжают занимать ведущее положение, составляя 60—80% от общего количества средств автоматизации. Примерно такова же картина в химической и смежных с ней отраслях народного хозяйства СССР.

Широкому распространению пневмоавтоматики в определенной мере способствует иерархическая структура внедряемых в настоящее время АСУТП. На верхних уровнях иерархии в основном применяют ЭВМ, которые решают сложные задачи оптимального управления и идентификации математических моделей, на нижних уровнях более целесообразно использование пневматических средств автоматизации, выполняющих простые, но ответственные функции стабилизации объектов управления. Пневматические АСР находят применение и для резервирования отдельных контуров непосредственного цифрового управления, осуществляемого управляющей вычислительной машиной.

Гидравлические средства автоматизации находят весьма ограниченное применение в химической и смежных с ней отраслях промышленности. Однако эти сред-

ства незаменимы, когда для перемещения регулирующих или запорных органов требуются значительные усилия или же когда предъявляются повышенные требования к динамическим и эксплуатационным (надёжным) показателям исполнительных механизмов АСР. Гидравлические исполнительные механизмы уже сейчас применяются в электронных регуляторах, используемых для автоматизации территориально разбросанных объектов; в дальнейшем такие комбинированные АСР будут находить все более широкое распространение в народном хозяйстве.

Настоящее учебное пособие написано на основе курса лекций, читаемого авторами в Московском институте химического машиностроения для студентов, специализирующихся в области автоматизации химических производств. За время, прошедшее после выхода первого издания в 1973 г., пневматические средства автоматизации претерпели определенные изменения, появились новые пневматические элементы и приборы, расширилась область применения пневмоавтоматики, улучшились многие показатели регуляторов и пневматических устройств. Поэтому в процессе подготовки второго издания фактически все разделы книги подверглись значительной переработке.

Авторы признательны профессору Обновленскому П. А. за ценные замечания, сделанные им при рецензировании книги.

Все пожелания и замечания читателей будут приняты авторами с благодарностью.

АВТОРЫ

ВВЕДЕНИЕ

При выборе пневматических и гидравлических устройств и регуляторов для автоматизации химических производств обычно учитывают (помимо требований пожарной и взрывобезопасности) их динамические характеристики, показатели надежности, стоимость и иногда точность (погрешность). Показатели качества работы автоматизированной системы регулирования (АСР) в той или иной мере зависят от характеристик и показателей отдельных ее элементов.

Динамические характеристики средств автоматизации существенно влияют на запас устойчивости АСР и качество переходных процессов. На рис. В.1 приведена структурная схема типичной АСР. Выходная (контрольная) координата y_1 объекта 1 измеряется первичным преобразователем (датчиком) 2 с электрическим неунифицированным выходным сигналом y_2 , который поступает в нормирующий усилитель 3, а затем y_3 — в электропнеумопреобразователь 4. В устройстве сравнения 5 пневматический сигнал y_4 вычитается из заданной функции y_0 , и разность y_5 поступает на вход пневматического регулятора 6. Управляющее (командное) воздействие y_6 в виде изменения давления воздуха проходит через пневматическую линию 7 в усилитель расхода (позиционер) 8, а затем в исполнительный механизм 9. Последний перемещает регулирующий орган 10 и тем самым изменяет входную координату x объекта, динамические свойства которого описываются передаточной функцией $W(s) = y_1(s)/x(s)$ (здесь s — комплексная переменная: $s = \alpha + i\omega$; α, ω — действительные аргументы, $i = \sqrt{-1}$).

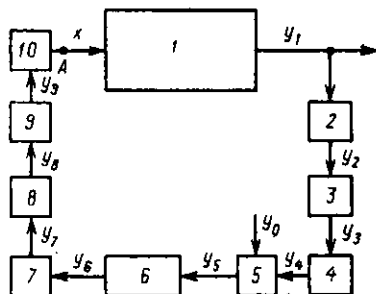
Устойчивость рассмотренной линейной системы исследуют путем анализа угла поворота вектора $1 + W_{p.c}(i\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до ∞ . Здесь $W_{p.c}(i\omega)$ — амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) разомкнутой в точке А системы:

$$W_{p.c}(i\omega) = W_1(i\omega) W_2(i\omega) \cdots W_{10}(i\omega) = \prod_{j=1}^{10} W_j(i\omega)$$

где Π — символ произведения; $W_j(i\omega)$, $j = 1, 2, \dots, 10$ — АФХ элементов АСР, изображенной на рис. В.1. Из приведенного выражения видно, что устойчивость АСР определяется передаточными функциями (АФХ) всех элементов системы.

Рис. В.1. Структурная схема автоматической системы регулирования (АСР):

1 — объект; 2 — первичный преобразователь (датчик); 3 — усилитель электрического сигнала; 4 — преобразователь электрического сигнала в пневматический; 5 — устройство сравнения; 6 — регулятор; 7 — пневматическая линия; 8 — усилитель расхода воздуха; 9 — исполнительный механизм, 10 — регулирующий орган.



Для объекта с передаточной функцией $W_1(s)$ при заданном возмущении $x(s) = \Delta x/s$ (где $\Delta x = \text{const}$) переходный процесс $y_1(s)$ определяется выражением (рис. В.1):

$$y_1(s) = \frac{x(s) W_1(s)}{1 + W_{p.c}(s)} = \frac{\Delta x W_1(s)}{s [1 + W_1(s) W_2(s) \dots W_{10}(s)]}$$

Таким образом, для получения желаемого переходного процесса $y_1(s)$ необходимо учитывать динамические характеристики всех элементов АСР [хотя фактически влиять на форму $y_1(s)$ или $y_1(t)$ можно выбором передаточной функции регулятора $W_6(s, C_0, C_1, C_2)$ с варьируемыми параметрами настройки C_0, C_1, C_2].

Одним из основных показателей надежности АСР является вероятность $P(t)$ ее безотказной работы на отрезке времени $[0, t]$. Для системы, структурная схема которой изображена на рис. В.1, она определяется характеристиками надежности всех десяти элементов:

$$P(t) = P_1(t) P_2(t) \dots P_{10}(t) = \prod_{j=1}^{10} P_j(t)$$

где $P_j(t)$ — функция распределения времени безотказной работы j -го устройства ($0 \leq P_j(t) \leq 1, j = 1, 2, \dots, 10$). Использование в подобной системе хотя бы одного ненадежного элемента с относительно малыми значениями $P_j(t)$ приводит к существенному уменьшению надежности всей АСР. Таким образом, при создании достаточно надежной АСР необходимо стремиться к тому, чтобы надежность всех устройств была примерно одинаковой.

При проектировании АСР всегда стремятся уменьшить ее стоимость, которая, естественно, определяется стоимостью всех входящих в систему устройств. Хотя между стоимостью элемента и его надежностью нет строгой функциональной зависимости, однако, как показы-

дает практика, чем надежнее устройство, тем выше его стоимость. Поэтому при выборе средств автоматизации необходимо учитывать не только их стоимость, но и показатели надежности.

Важным показателем работы средств автоматизации является случайная погрешность преобразования (передачи) сигнала, обычно характеризующаяся средней квадратической ошибкой σ_j ($j=2, 3, \dots, 10$). Если положить, что погрешности всех (не считая объекта регулирования 1) элементов АСР, изображенной на рис. В.1, линейно независимы, то среднюю квадратическую ошибку системы

можно вычислить по формуле $\sigma = \left(\sum_{j=2}^{10} \sigma_j^2 \right)^{1/2}$. Квадрати-

ческий характер этого выражения предопределяет, что σ системы наиболее сильно зависит от самых «неточных» элементов. Поэтому при создании достаточно точной (в смысле величины σ) АСР следует выбирать все ее элементы с примерно одинаковыми показателями σ_j . Заметим, что стремление повысить точность АСР почти всегда приводит к увеличению ее стоимости и достаточно часто — к снижению надежности.

Авторы предлагаемого пособия знакомят читателей с конструкцией и принципом действия основных элементов и приборов пневмо- и гидроавтоматики, приводят анализ их статических и динамических характеристик, а также оценки показателей надежности (предполагается, что читатели знакомы с основными понятиями теории автоматического управления, изучаемой в технических вузах). Изложение материала ведется от простого к сложному.

В первых двух главах рассмотрены простейшие элементы пневмо- и гидроавтоматики (дрессели, мембраны, емкости и т. п.). Далее показано, как из них можно собрать более сложные устройства (усилители, сумматоры, интеграторы и т. п.), дан анализ их статических и динамических характеристик. Наконец, рассматриваются принципы действия и характеристики типовых регуляторов, реализующих П-, ПИ- и ПИД-законы регулирования.

В третьей главе приведены основные показатели надежности элементов, ряда простых соединений элементов и, наконец, характеристики эффективности сложных систем. Рассмотрены методы оценки показателей надеж-

ности по результатам лабораторных испытаний или по статистическим данным об отказах, полученным при эксплуатации средств пневмо- и гидроавтоматики. Предполагается, что читатель знаком с основами теорий вероятности и математической статистики, обычно излагаемыми в технических вузах; необходимые для понимания сведения из статистической теории надежности даны в ходе изложения.

Четвертая глава посвящена пневматическим системам регулирования и управления, нашедшим широкое применение при автоматизации объектов химической и смежных отраслей промышленности; рассмотрено применение средств пневмоавтоматики в АСУТП.

В Приложениях приводится краткое описание конструкции и принципа действия встроенного пневматического регулятора типа 04, не вошедшего в Государственную Систему Приборов; дается перечень серийно выпускаемых пневматических устройств; рассматривается наиболее распространенная система подготовки сжатого воздуха для питания пневмоавтоматики.

СРЕДСТВА ПНЕВМОАВТОМАТИКИ

Пневматические устройства, регуляторы и приборы, применяемые при автоматизации объектов химической и смежных с ней отраслей промышленности, имеют ряд преимуществ перед средствами электро- и гидроавтоматики: пожаро- и взрывобезопасны; характеризуются высокой надежностью при работе в условиях агрессивных сред и резких колебаний температуры; просты в эксплуатации; недороги; используют повсеместно имеющийся рабочий агент — воздух.

Системы регулирования с пневматическими устройствами имеют и ряд недостатков: низкое быстродействие (скорость распространения пневматического сигнала равна скорости звука в воздухе, т. е. несколько больше 330 м/с); ограниченную протяженность пневмолиний для передачи сигналов (не более 250—300 м); большие размеры пневматических мембранных исполнительных механизмов (что обусловлено сравнительно низким давлением рабочего агента). Эти недостатки ограничивают область применения пневматических средств для автоматизации сравнительно инерционных объектов с постоянными времени не менее 5—10 с, расположенных на расстоянии 250—300 м от центральных пунктов управления.

Рабочим агентом в пневмоавтоматике служит сжатый воздух относительной влажностью не более 50—60% и давлением* из стандартного диапазона (0,196—0,98) 10^5 Па (в традиционной системе единиц 0,2—1,0 кгс/см²), а для средств струйной техники — давлением 0—980 Па (0—100 мм вод. ст.).

1.1. ПРОСТЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Под *элементами* в пневмоавтоматике понимают относительно простые функционально и (или) законченные конструктивно части более сложного устройства, пред-

* В дальнейшем для упрощения изложения используется приближенный перевод различных единиц измерения давления в Па: 1 кгс/см² = 0,98 · 10⁵ Па ≈ 1,0 · 10⁵ Па; 1 мм вод. ст. = 9,8 Па ≈ 10 Па. Тогда давление воздуха в средствах пневмоавтоматики будет изменяться в диапазонах (0,2—1,0) 10⁵ Па и 0—1000 Па, а давление питания окажется равным 1,4 · 10⁵ Па с допустимыми колебаниями ±0,14 · 10⁵ Па.

назначенные для выполнения одной сравнительно простой операции или преобразования сигнала.

Элементы условно можно классифицировать на *простые* (неделимые) и *составные*. К простым относятся пневматические емкости, дроссели, пневмопроводы, мембраны, сильфоны, пружины и, наконец, механические рычаги. Из них собирают составные элементы: пневматические камеры, преобразователи, усилители, сумматоры. Каждый составной элемент выполняет одну операцию или функцию. Пневматическое устройство в целом реализует, как правило, ту или иную функцию переработки информации.

Емкости

Емкости предназначены для накопления сжатого воздуха. Параметры емкости — ее объем V и (иногда) число вводов (выводов) потоков воздуха. Различают емкости *постоянного* и *переменного* объема (рис. 1.1), причем в последнем случае объем V изменяют вручную. Входной координатой являются давление P_1 и расход G воздуха на входе в емкость, выходной — давление воздуха P или его масса M в емкости. Переменные P и M связаны между собой уравнением состояния Клапейрона $MR\theta = PV$ (где R — универсальная газовая постоянная для воздуха, θ — абсолютная температура). В пневмоавтоматике используют пневматические емкости относительно небольших объемов (не более 30—50 см³). Поэтому при малых гидравлических сопротивлениях вводов и выводов давление P во всех точках емкости устанавливается практически мгновенно, как только изменятся P_1 или G_1 . Поэтому при отсутствии дросселей на вводах и выводах потоков воздуха пневмоемкость можно рассматривать как усилительное звено с коэффициентом усиления давления, равным единице.

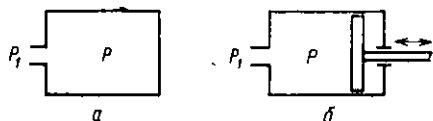


Рис. 1.1. Схемы пневматических емкостей постоянного (а) и переменного (б) объема.

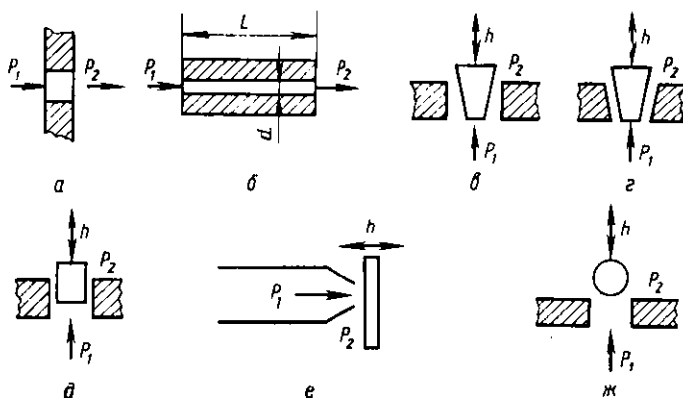


Рис. 1.2. Принципиальные схемы дросселей:

а — капилляр; *б* — жиклер; *в* — конус-цилиндр; *г* — конус-конус; *д* — цилиндр-цилиндр; *е* — сопло-заслонка; *ж* — шарик-цилиндр.

Пневмостойкость не получила самостоятельного применения, однако в сочетании с дросселями на вводах и выводах ее широко используют для построения проточных и глухих камер.

Дроссели

Дроссели (пневмостойкости) предназначены для создания местного гидравлического сопротивления движущемуся потоку воздуха и, следовательно, для изменения его расхода. Поэтому основной выходной координатой дросселя является расход воздуха G , а входными — давления воздуха до и после дросселя P_1 и P_2 либо их разность $\Delta P = P_1 - P_2$.

По режиму течения воздуха дроссели делятся на ламинарные, турбулентные и смешанные; по способу создания сопротивления — на постоянные, регулируемые (вручную) и переменные; по виду статической характеристики — на линейные и нелинейные.

В ламинарных дросселях установившиеся линии токов воздуха не пересекаются друг с другом, скорость потока невелика ($Re < 2300$), температура практически постоянна. Гидравлическое сопротивление создается за счет сил вязкого трения слоев воздуха друг с другом и со стенкой канала. Подобные ламинарные режимы наблюдаются в дросселях типа *капилляр* (рис. 1,2,а) с

большим отношением длины к диаметру (обычно $L/d > 10$).

Для *турбулентных* дросселей характерны интенсивное хаотическое перемешивание линий токов воздуха, большие значения скоростей и критерия Re , малые отношения L/d и адиабатическое изменение состояния воздуха. Гидравлическое сопротивление создается за счет вихреобразований, особенно сильных при сужении и расширении струи воздуха. В турбулентных дросселях, например типа *жиклер* (рис. 1.2, б), могут наблюдаться докритические (скорость потока меньше скорости звука) и надкритические (скорости потока и звука равны) режимы.

Деление дросселей на ламинарные и турбулентные условно, так как режим течения воздуха зависит и от конструкции дросселя, и от условий его работы, в частности от перепада давлений ΔP . Дроссели, в которых возможен и ламинарный, и турбулентный режим, называют смешанными.

В *постоянных* дросселях площадь проходного сечения не меняется; примерами таких дросселей служат уже упоминавшиеся капилляр и жиклер (рис. 1, 2, а, б). Постоянные дроссели (как и все другие) характеризуются только статическими характеристиками, так как в динамическом отношении они являются безынерционными звеньями: геометрические размеры каналов дросселей обычно очень малы (например, длина капилляра не более 20 мм, диаметр 0,18 или 0,32 мм), поэтому все переходные процессы, распространяющиеся со скоростью звука, заканчиваются в дросселях практически мгновенно.

Статическая расходная характеристика турбулентного дросселя (жиклера) при докритическом истечении воздуха ($P_2/P_1 \geq 0,528$) нелинейна относительно давлений P_1 и P_2 ; при малых перепадах ΔP она имеет вид:

$$G = a \sqrt{P_1 - P_2} \quad (1.1)$$

где G — массовый расход воздуха; $a \approx \mu \epsilon F \sqrt{2\rho_1}$; μ — коэффициент расхода воздуха; ϵ — поправочный множитель, учитывающий изменение плотности; F — площадь проходного сечения жиклера; ρ_1 — плотность воздуха перед дросселем. Обычно коэффициент a находят для каждого дросселя по экспериментальным данным. Семейство статических характеристик турбулентного жик-

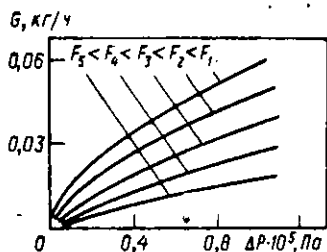


Рис. 1.3. Семейство статических характеристик турбулентного дросселя (жиклера) при разных площадях F .

лера при разных площадях F показано на рис. 1.3. Из их анализа следует, что статическая характеристика жиклера

может быть линеаризована в малом при изменении ΔP на $(0,1-0,2) \cdot 10^5$ Па.

При надкритическом истечении воздуха ($P_2/P_1 < 0,528$) массовый расход через жиклер зависит только от давления P_1 и равен $G \approx \mu C_1 F P_1$, где C_1 — некоторый коэффициент.

Статическая расходная характеристика ламинарного дросселя (капилляра) при малых перепадах давления зависит от P_1 и P_2

$$G = a (P_1 - P_2) \quad (1.2)$$

Здесь коэффициент a называют проводимостью дросселя (коэффициентом усиления). Проводимость можно вычислить по формуле $a \approx \pi d^4 (P_1 + P_2) / 256 L \eta R \theta$ (где η — коэффициент динамической вязкости воздуха), однако надежнее определять ее по экспериментальным данным.

К *регулируемым* дросселям относят конус — цилиндр, конус — конус и цилиндр — цилиндр (рис. 1.2, в—д). Перемещение h внутренних конусов или цилиндра осуществляется вручную и вызывает изменения площади F или гидравлического сопротивления кольцевого зазора. В регулируемых дросселях возможны турбулентные, ламинарные и переходные режимы истечения воздуха. Статические расходные характеристики таких дросселей описываются сложными нелинейными выражениями, в которые всегда входят экспериментально определяемые параметры. При небольших перепадах ΔP и перемещениях h регулируемые дроссели можно рассматривать как линейные и описывать их статические характеристики выражением (1.2). К регулируемым дросселям, обладающим линейными расходными характеристиками во всем диапазоне изменения ΔP , относятся так называемые пульсирующие сопротивления, рассмотренные далее, в разделе 1.3.

Переменные дроссели типа сопло — заслонка и шарик — цилиндр показаны на рис. 1.2, е, ж. Перемещение заслонки и шарика осуществляется с помощью какого-

либо другого элемента пневмоавтоматики. В дросселе первого типа изменение гидравлического сопротивления достигается за счет сил трения воздуха о сопло и заслонку и эффектов сжатия и расширения струи. Величина h мала (порядка 0,03—0,1 мм), поэтому дроссель чувствителен к перекосам и вибрациям заслонки. Дроссель второго типа более надежен, так как шарик самоцентрируется в струе воздуха. Изменение расхода достигается изменением площади F и гидравлического сопротивления потоку воздуха при перемещении шарика. Для переменных дросселей характерен турбулентный режим истечения воздуха, статические характеристики их описываются зависимостями типа приведенных выше при $P_2/P_1 \geq 0,528$ и при $P_2/P_1 < 0,528$. Входящие в них параметры a , μ , C_1 следует определять по экспериментальным данным для каждого типа дросселя. При малых изменениях h и ΔP статические характеристики переменных дросселей можно рассматривать как линейные в малом.

Наибольшее распространение в пневмоавтоматике получили ламинарные дроссели типа капилляр ($L = 20$ мм, $d = 0,18$ и $0,32$ мм) и конус — конус, а также турбулентные сопло — заслонка ($h = 0,03—0,1$ мм, $d \approx 0,5$ мм) и шарик — цилиндр.

Пневмопроводы

Пневмопроводы служат для передачи импульса давления или изменений расхода воздуха на достаточно большие расстояния L (от нескольких метров до 250—300 м). Пневмопроводы выполняют из пластмассовых или металлических трубок внутренним диаметром $d = 1—8$ мм; иногда пластмассовые трубки объединяют в пневмокабели (рис. 1.4, а, б). Пневмопроводы используют для соединения отдельных элементов и устройств внутри пневматических приборов ($L \approx 1—2$ м, $d \approx 1—3$ мм), а также для передачи сигналов от первичных преобразователей к приборам и от регуляторов к мембранным исполнительным механизмам ($L \leq 250—300$ м, $d = 4—8$ мм). В первом приближении пневмопровод можно рассматривать как ламинарный дроссель типа капилляр. При этом, однако, нужно учитывать следующее: значительную пневматическую емкость, распределенную по всей длине L ; большие гидравлические сопротивления, за-

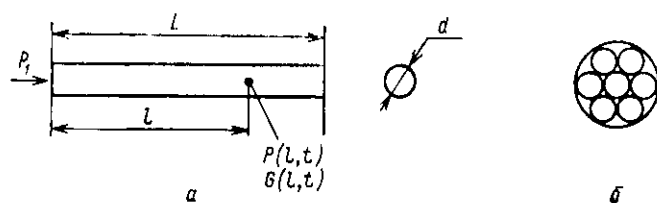


Рис. 1.4. Схемы одиночного пневмопровода (а) и пневмокабеля (б).

трудняющие передачу сигналов и вносящие в них фазовые искажения.

Пневмопроводы классифицируют на расходные и безрасходные.

В *расходных* пневмопроводах всегда есть расход воздуха (который служит характеристикой передаваемого сигнала) и потери давления на преодоление сил вязкого трения слоев воздуха друг о друга и о стенку. При расчете расходных пневмопроводов стремятся уменьшить гидравлическое сопротивление потоку воздуха, увеличивая площадь проходного сечения и снижая линейную скорость. Это ведет к увеличению емкости пневмопровода и ухудшению его динамических характеристик, поэтому соотношения диаметра и длины пневмопровода должны быть оптимальны.

Наибольшее распространение в пневмоавтоматике получили *безрасходные* пневмопроводы, предназначенные для передачи сигналов в виде давления на большие расстояния. При изменении давления P_1 на входе в пневмопровод возникает волна уплотнения, распространяющаяся по всему объему со скоростью звука ω и вызывающая перетоки (расходы) воздуха. Однако в статических режимах давление $P(l, t) \equiv P_1$, и расход воздуха $G(l, t)$ в пневмопроводе равен нулю.

Безрасходный пневмопровод является элементом с распределенными по длине l выходными координатами $P(l, t)$, $G(l, t)$. Динамика пневмопровода описывается системой линейных гиперболических уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + C_1 \frac{\partial G}{\partial t} + C_2 G = 0; \quad \frac{\partial G}{\partial t} + C_3 \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad (1.3)$$

где C_1 — C_3 — коэффициенты: $C_1 = 4\rho/\pi d^2$; $C_2 = 128\eta/d^4\pi$; $C_3 = \pi d^2/\omega^2\rho^2$; η , ρ — динамическая вязкость и плотность воздуха. Для получения единственного решения

системы (1.3) нужно задать соответствующие начальные и граничные условия:

$$P(l, 0) = P_1(0), G(l, 0) = 0, P(0, t) = P_1(t), G(L, t) = 0 \quad (1.3a)$$

Последнее условие записывают для закрытого пневмопровода. Построение и дальнейшее использование аналитического решения системы (1.3), (1.3a) вызывает значительные трудности, поэтому чаще всего динамику длинных пневмопроводов изучают экспериментально. Для этого в конечной точке пневмопровода снимают переходную функцию $P(t, L)$, которая аппроксимируется решением линейного дифференциального уравнения в обыкновенных производных. Далее находят дифференциальное уравнение и передаточную функцию, обычно имеющую вид

$$W(s) = P(s, L)/P_1(s) = \exp\{-s\tau\}/(T_1s + 1)$$

где τ — время транспортного запаздывания ($0,1 \leq \tau \leq \leq 4$ с); T_1 — постоянная времени пневмопровода; $1 \leq T_1 \leq 20$ с для $L \leq 300$ м. Значение τ приближенно можно оценить снизу по формуле $\tau < L/\omega$; значения τ , полученные по экспериментальным переходным функциям, всегда в 2—3 раза больше расчетных. Величина T_1 существенно зависит от длины L и диаметра d пневмопровода и отчасти — от материала трубки и качества ее обработки, а также от мощности источника давления P_1 .

На рис. 1.5,а показана зависимость постоянной времени T_1 от длины L пневмопровода, выполненного из металлической трубки $d=6$ мм. При увеличении диаметра T_1 уменьшается (рис. 1.5,б), что объясняется снижением скоростей перетоков воздуха и уменьшением гид-

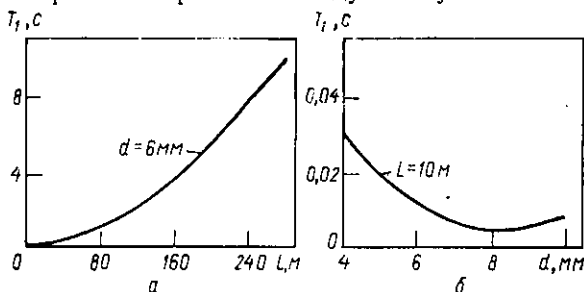


Рис. 1.5. Зависимость постоянной времени T_1 пневмопровода от его длины (а) и диаметра (б).

равлического сопротивления линии. Однако при дальнейшем увеличении d значение T_1 начинает возрастать, что обусловлено значительным ростом объема пневмопровода и ограниченностью мощности источника давления P_1 на входе в трубопровод. Оптимальный диаметр пневмопровода, при котором значение T_1 и фазовые искажения сигнала минимальны, зависит от его длины L и мощности источника давления.

На практике диаметр пневмопровода выбирают несколько меньше оптимального, так как инерционность при этом увеличивается незначительно, а расход материала на изготовление пневмолинии уменьшается существенно.

Мембраны

Мембраны применяют в пневмоавтоматике для преобразования давления воздуха в перемещение или в силу. Мембраны делят на упругие и «вялые».

Упругие мембраны выполняют из тонких металлических пластин (сталь, бронза, латунь). Они обладают достаточно большой собственной жесткостью, их статические характеристики, представляющие зависимость перемещения h центра мембраны или развиваемой силы Φ от давлений P_1 и P_2 или перепада $\Delta P = P_1 - P_2$, обычно нелинейны. Применяют плоские и гофрированные упругие мембраны (рис. 1.6, а, б). Наличие гофров делает статическую характеристику мембраны более линейной.

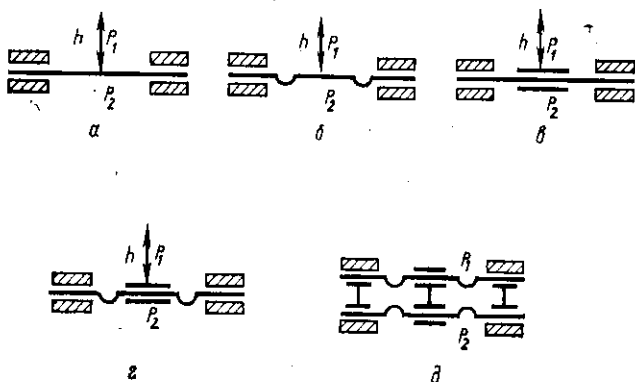


Рис. 1.6. Принципиальные схемы мембран:

а, б — упругой, плоской и гофрированной; в, г — «вялой» плоской и гофрированной; д — двойной гофрированной.

Упругие мембраны используют преимущественно как чувствительные элементы в первичных преобразователях, например в дифманометрах.

«Вялые» мембраны выполняют из прорезиненной тонкой ткани (капрон, шелк, полотно). К ним предъявляют два требования — отсутствие собственной жесткости и большая прочность. Эти требования вытекают из основного назначения «вялых» мембран — преобразовывать большие перепады давлений (до 10^5 Па) в силу при крайне малых перемещениях (порядка сотых долей мм). «Вялые» мембраны обычно снабжены металлическим жестким центром. Они могут быть плоскими и гофрированными (рис. 1.6, в, г).

Статическая характеристика «вялой» мембраны представляет зависимость силы Φ от перепада ΔP :

$$\Phi = \Delta P F_0, \quad (1.4)$$

где F_0 — эффективная площадь мембраны, причем всегда $F_0 < \pi d_m^2/4$ (d_m — диаметр мембраны, равный диаметру фланцев, между которыми она зажата). Выражение (1.4) справедливо при малых перемещениях жесткого центра мембраны (или, точнее, когда F_0 не зависит от h) и пренебрежимо малой жесткости самой мембраны. Эффективную площадь «вялой» мембраны при таких условиях оценивают по формуле

$$F_0 \approx \pi (d_m^2 + d_{\text{ц}}^2 + d_m d_{\text{ц}}) / 12$$

где $d_{\text{ц}}$ — диаметр жесткого центра; $d_{\text{ц}} \approx (0,4 - 0,8) d_m$. В этом случае статическая характеристика «вялой» мембраны является линейной в малом.

В общем случае F_0 зависит от перемещения h , что делает функцию (1.4) нелинейной по аргументу ΔP , так как h , в свою очередь, определяется ΔP . Тогда

$$\Phi = \Delta P F_0(h) = \Delta P F_0[h(\Delta P)] \quad (1.4a)$$

Для ослабления зависимости F_0 от h и уменьшения нелинейности функции (1.4a) применяют гофрированные мембраны (рис. 1.6, г). Однако при смене знака ΔP возможно резкое изменение положения гофров («прохлопывание»), что влияет на F_0 и делает статическую характеристику (1.4a) существенно нелинейной. Для борьбы с «прохлопыванием» применяют двойные гофрированные мембраны (рис. 1.6, д).

Тонкие «вялые» мембраны широко применяют в различных устройствах пневмоавтоматики, построенных на

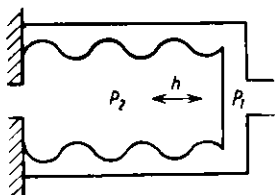


Рис. 1.7. Принципиальная схема сифона.

принципе сравнения сил (сумматоры, усилители, повторители).

Недостатком таких мембран является довольно быстрая потеря эластичности и изменение статических характеристик как во время работы, так и при длительном хранении.

В пневматических исполнительных механизмах широко используют многослойные прорезиненные мембраны больших диаметров d_m , предназначенные для преобразования перепада ΔP в большие усилия, необходимые для перемещения регулирующих и запорных органов. В этих мембранах перемещение жесткого центра достигает 20—60 мм, что, естественно, увеличивает нелинейность статической характеристики.

Сифоны

Сифоны предназначены для преобразования давления или силы в перемещения (рис. 1.7). Они представляют собой упругие тонкостенные гофрированные оболочки (трубки), изготавливаемые из бронзы с различными присадками или из специальных сталей. Наличие гофров позволяет перемещать днище сифона на значительное расстояние (десятки миллиметров) без заметного изменения его характеристик. Выходная координата сифона — перемещение h , входные — давления P_1 и P_2 или их разность ΔP либо сила Φ . Сифоны обладают достаточно большой собственной жесткостью (для увеличения которой в них иногда вставляют пружины), поэтому при малых изменениях ΔP их статические характеристики считаются линейными:

$$h = \Phi / k_c = F_3 (P_1 - P_2) / k_c \quad (1.5)$$

где k_c — коэффициент жесткости сифона; F_3 — эффективная площадь, практически не зависящая от перемещения h . Значение F_3 определяют по эмпирической формуле $F_3 \approx \pi (d_n + d_{\text{вн}})^2 / 16$ (где d_n и $d_{\text{вн}}$ — наружный и внутренний диаметры сифона). Статическая характеристика (1.5) иногда имеет гистерезис, зона которого зависит от коэффициента жесткости, размеров и числа гофров и т. п. Для уменьшения зоны гистерезиса применяют пружины.

При небольших изменениях ΔP сильфоны можно рассматривать как колебательные звенья и описывать их динамические свойства передаточной функцией

$$W(s) = \frac{h(s)}{\Delta P(s)} = \frac{F_3/k_c}{T_2 s^2 + T_1 s + 1} \quad (1.6)$$

Параметры T_2 , T_1 обычно малы, и в области низких частот ω сильфон можно считать усилительным звеном с передаточной функцией $W(s) = F_3/k_c$.

Статические характеристики сильфонов очень незначительно изменяются во времени, поэтому сильфоны все шире и шире применяют в различных ответственных устройствах пневмоавтоматики. Как правило, их используют для работы на сжатие, т. е. при $P_1 > P_2$, однако при малых перемещениях допустимо применение сильфонов и при $P_1 < P_2$, т. е. при работе на растяжение.

Пружины

Пружины предназначены для преобразования силы в перемещение, часто — значительное. По форме они делятся на *цилиндрические* и *профильные* (рис. 1.8, а, б), по направленности действия — на пружины *сжатия*, *растяжения*, *кручения* и (реже) *изгиба*. Выходная координата пружины — перемещение h , входная — сила Φ . Статическая характеристика пружины: $h = \Phi/k_n$ (где k_n — коэффициент жесткости пружины, зависящий от материала, диаметра проволоки d_1 , диаметра пружины d , числа витков n).

В динамическом отношении пружина является колебательным звеном с передаточной функцией типа (1.6). Как и сильфон, при малых частотах ω пружину можно рассматривать как усилительное звено с коэффициентом передачи $1/k_n$.

На рис. 1.8, в показано условное обозначение пружин на принципиальных схемах пневмоавтоматики.

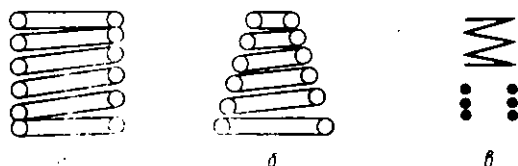


Рис. 1.8. Схемы пружин:

а — цилиндрической; б — профильной; в — условные обозначения.

Механические рычаги

Рычаги представляют собой механические стержни с одной или двумя осями вращения, которые либо перемещаются в пространстве, либо закреплены неподвижно (рис. 1.9, а, б). Рычаги применяют для суммирования и усиления перемещений и сил.

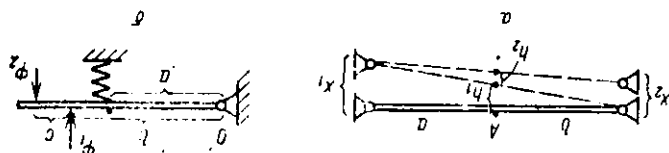


Рис. 1.9. Принципиальные схемы рычажных сумматоров перемещений (а) и усилий (б).

Рычажный сумматор перемещений (рис. 1.9, а) имеет две оси вращения в крайних точках, каждая из которых может перемещаться на расстоянии x_1 и x_2 . Результирующее перемещение h некоторой точки А равно $h_1 + h_2$ (см. обозначения на рис. 1.9, а). Используя подобие треугольников, получим:

$$h = \frac{b}{a+b} x_1 + \frac{a}{a+b} x_2 = k_1 x_1 + k_2 x_2 \quad (1.7)$$

где $k_1 = b/(a+b)$, $k_2 = a/(a+b)$, $k_1 + k_2 = 1$.

Схема рычажного сумматора усилий показана на рис. 1.9, б. Он одновременно выполняет функции преобразователя сил в перемещения. Этот сумматор является составным элементом, так как в него входят собственно рычаг с осью вращения и пружина обратной связи. Приложим к рычагу в двух различных точках две силы Φ_1 и Φ_2 , под действием которых он будет поворачиваться относительно оси и сжимать пружину обратной связи. Равновесие рычага возможно при равенстве моментов сил: $\Phi_1 b - \Phi_2 (c+b) - \Phi a = 0$. Отсюда можно найти результирующую силу Φ , развиваемую пружиной: $\Phi = [\Phi_1 b - \Phi_2 (c+b)]/a$.

В свою очередь, $\Phi = k_n h$ (где k_n — коэффициент жесткости пружины, h — перемещение ее под действием сил Φ_1 и Φ_2). Нетрудно получить уравнение статики преобразователя сил в перемещение: $h = [\Phi_1 b - \Phi_2 (c+b)]/ak_n$.

1.2. СОСТАВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА

В этом разделе рассмотрены составные элементы (камеры, усилители, преобразователи, сумматоры), а также некоторые наиболее простые устройства пневмоавтоматики (интеграторы, дифференциаторы и другие).

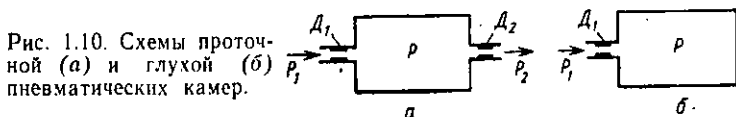
Пневматические камеры

Камеры предназначены для аккумуляции сжатого воздуха и изменения его давления во времени по определенному закону. Они относятся к составным элементам пневмоавтоматики и конструируются из пневмоемкостей и дросселей на вводах (выводах) потоков воздуха (рис. 1.10, а, б). Основные конструктивные параметры камер — их объем V , число и тип дросселей, проводимости (a_1 , a_2) или площади проходных сечений (F_1 , F_2) дросселей. Выходная координата камеры — давление воздуха P в пневмоемкости, входные — давления P_1 и P_2 перед дросселем D_1 и за дросселем D_2 . По числу вводов камеры делятся на *проточные* (два и более вводов) и *глухие* (один подвод воздуха), по режиму течения воздуха через дроссели — на *ламинарные*, *турбулентные* и *комбинированные*.

Статика проточных пневматических камер с турбулентными постоянными или регулируемыми дросселями описывается достаточно сложным нелинейным уравнением $f(P, P_1, P_2, F_1, F_2) = 0$.

Статические характеристики проточных камер с турбулентными докритическими и надкритическими режимами течения воздуха через дроссели показаны на рис. 1.11, а. Как следует из анализа кривых, проточную камеру можно рассматривать как линейное звено только при малых изменениях перепадов давлений $P_1 - P$ и $P - P_2$. Коэффициенты усиления проточной камеры по входным переменным P_1 и P_2 всегда меньше единицы.

Статические характеристики проточной камеры с ламинарными дросселями (рис. 1.11, б) можно считать ли-



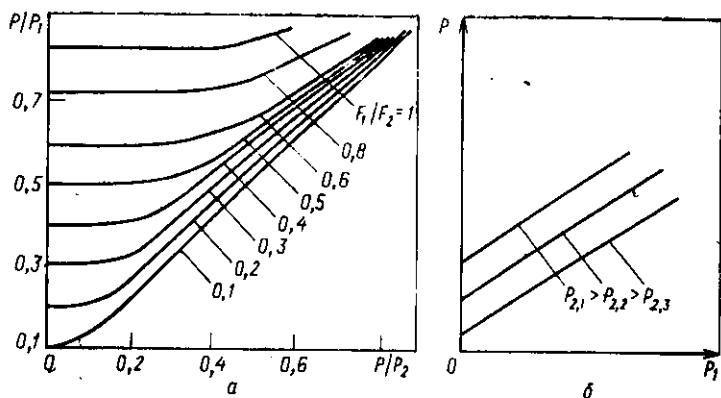


Рис. 1.11. Статические характеристики проточных камер с турбулентными (а) и ламинарными (б) дросселями.

нейными в относительно большом интервале изменения перепадов $P_1 - P$ и $P - P_2$ (порядка $\pm 0.2 \cdot 10^5$ Па). Вывод уравнения статики дан ниже.

Уравнение статики глухой камеры с любыми дросселями на вводах имеет простой вид: $P = f(P_1) = P_1$. Коэффициент усиления такой камеры всегда равен единице.

Для определения динамических характеристик проточной камеры примем следующие допущения: режимы истечения воздуха изотермичны; количество движения, вносимое струей воздуха, пренебрежимо мало; перепады давлений $P_1 - P$ и $P - P_2$ невелики; дроссели D_1 и D_2 ламинарные. Два последних допущения позволяют считать статические характеристики дросселей линейными [см. уравнение (1.2)].

Найдем массу воздуха $M = PV/R\theta$ в камере постоянного объема V . Скорость изменения массы равна разности массовых расходов G_1 и G_2 через дроссели D_1 и D_2 с проводимостями a_1 и a_2 :

$$\frac{dM}{dt} = \frac{VdP}{R\theta dt} = G_1 - G_2 \approx a_1 (P_1 - P) - a_2 (P - P_2)$$

После несложных преобразований получим линейное в малом уравнение динамики проточной камеры:

$$T_1 \frac{dP}{dt} + P = k_1 P_1 + k_2 P_2 \quad (1.8)$$

где T_1 — постоянная времени камеры; k_1 и k_2 — коэф-

коэффициенты усиления по переменным P_1, P_2 :

$$T_1 = \frac{V}{R\theta(a_1 + a_2)}, \quad k_1 = \frac{a_1}{(a_1 + a_2)}, \quad k_2 = \frac{a_2}{(a_1 + a_2)}, \quad k_1 + k_2 = 1$$

Постоянная времени T_1 в первом приближении служит числовой характеристикой динамических свойств или инерционности камеры и используется для оценки длительности переходных процессов по давлению $P(t)$. Принято считать, что переходные процессы практически завершаются (с погрешностью около 4% от установившегося значения) к моменту времени $t \approx 3T_1$. Поэтому при $t > 3T_1$ в проточной камере устанавливается статический режим, описываемый уравнением $P = k_1 P_1 + k_2 P_2$.

Постоянная времени T_1 определяется объемом камеры V и значениями проводимостей a_1, a_2 , которые, в свою очередь, прямо пропорциональны d^4 (где d — диаметр проходного сечения ламинарного дросселя). Поэтому, изменяя диаметр или площадь регулируемого дросселя, можно сравнительно легко получать пневмокамеры с различными динамическими характеристиками. В частности, если вообще снять дроссели и тем самым существенно увеличить проводимости a_1 и a_2 , то постоянная времени T_1 окажется малой величиной (порядка сотых или десятых долей секунды), проточная камера превратится в пневмодетандер и может рассматриваться как линейное усилительное звено.

Для глухой камеры проводимость $a_2 = 0$, и уравнение (1.8) упрощается:

$$\frac{T_1' dP}{dT} + P = P_1 \quad \text{где} \quad T_1' = \frac{V}{RTa_1} \quad (1.9)$$

Решение этого уравнения при ступенчатом изменении $P_1(t) = \Delta = \text{const}$ в момент времени $t = 0$ и $P(0) = P_0$ имеет вид:

$$P(t) = P_0 + \Delta(1 - \exp\{-t/T_1'\}) \quad (1.10)$$

Переходная функция по давлению в глухой камере показана на рис. 1.12.

Динамика проточной и глухой камер с турбулентными дросселями приближенно может быть описана уравнениями (1.8) и (1.9), однако диапазоны допустимых изменений перепадов $P_1 - P, P - P_2$ здесь уже, чем при использовании ламинарных дросселей. Кроме того, проводимости a_1, a_2 зависят от равновесных давлений P, P_1, P_2 , в малых окрестностях которых осуществляется линей-

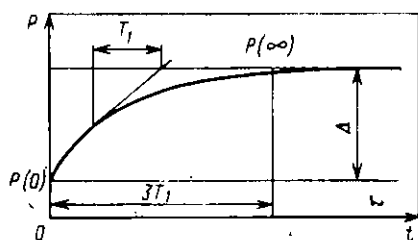


Рис. 1.12. Переходная функция глухой камеры.

аризация статических характеристик дросселей (см. рис. 1.11, а).

Пневматические камеры широко применя-

ют в пневмоавтоматике для создания интеграторов, дифференциаторов, фильтров низких и средних частот, сумматоров, делителей, преобразователей.

Дроссельные сумматоры и делители

Выше рассматривались сумматоры перемещений и усилий, реализуемые на механических рычагах. Для суммирования давлений применяют *дроссельные сумматоры* (другие типы сумматоров, в частности мембранные, описаны ниже).

Простейший сумматор давлений легко получить из проточной камеры, если сделать ее объем V достаточно малым (рис. 1.13, а). Тогда постоянная времени камеры $T_1 = V/R\theta(a_1 + a_2)$ пренебрежимо мала, а из уравнения (1.8) получим: $P(t) = k_1 P_1(t) + k_2 P_2(t)$, где $k_1 + k_2 = 1$. Изменяя проводимости дросселей, можно суммировать давления с разными весовыми множителями. Давление P всегда ограничено снизу и сверху значениями P_1 и P_2 , поэтому такой сумматор можно называть делителем давления.

Рассмотрим проточную малоннерционную камеру (рис. 1.13, б) с n входами и m выходами, на каждом из которых установлен линейный дроссель проводимостью соответственно a_i ($i = 1, 2, \dots, n$) и b_j ($j = 1, 2, \dots, m$). В

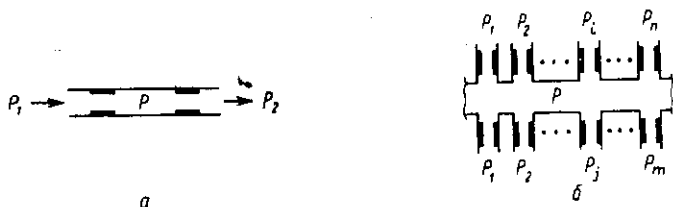


Рис. 1.13. Схемы дроссельных сумматоров для двух сигналов (а) и для произвольного числа сигналов (б).

статике имеем баланс расходов воздуха через входные и выходные дроссели:

$$\sum_{i=1}^n a_i (P_i - P) = \sum_{j=1}^m b_j (P - P_j)$$

Преобразуя это равенство, определим давление воздуха в камере:

$$P = \left(\sum_{i=1}^n a_i P_i + \sum_{j=1}^m b_j P_j \right) \bigg/ C = \sum_{i=1}^n \bar{a}_i P_i + \sum_{j=1}^m \bar{b}_j P_j \quad (1.11)$$

$$\text{где } C = \sum_{i=1}^n a_i + \sum_{j=1}^m b_j; \quad \bar{a}_i = a_i / C; \quad \bar{b}_j = b_j / C; \quad i=1, 2, \dots, n; \\ j=1, 2, \dots, m.$$

Если все дроссели одинаковы и обладают проводимостью a , то

$$P = \left(\sum_{i=1}^n P_i + \sum_{j=1}^m P_j \right) \bigg/ (n + m) \quad (1.11a)$$

т. е. давление на выходе сумматора равно среднему арифметическому от P_i и P_j .

Дроссельные сумматоры характеризуются низкой точностью, так как выражения (1.11) и (1.11a) получены при весьма жестких и не всегда соблюдаемых условиях о малости перепадов давлений $P_i - P$ и $P - P_j$, ламинарности течения воздуха в дросселях и т. п. Отсутствие обратной связи делает работу такого сумматора нестабильной. На дроссельных сумматорах нельзя складывать сильно различающиеся давления, нельзя производить вычитание сигналов. Наконец, так как все $\bar{a}_i < 1$ и $\bar{b}_j < 1$, то P не равно сумме входных давлений, а пропорционально сумме их с весами $\bar{a}_i$, $\bar{b}_j$.

Преобразователи перемещений и усилий в давление

Эти элементы предназначены для преобразования малых перемещений и усилий в достаточно большие изменения давления воздуха. Эффект преобразования осуществляется чаще всего элементом, содержащим переменный дроссель.

Преобразователь перемещения в давление типа сопло — заслонка показан на рис. 1.14, а. В него входят

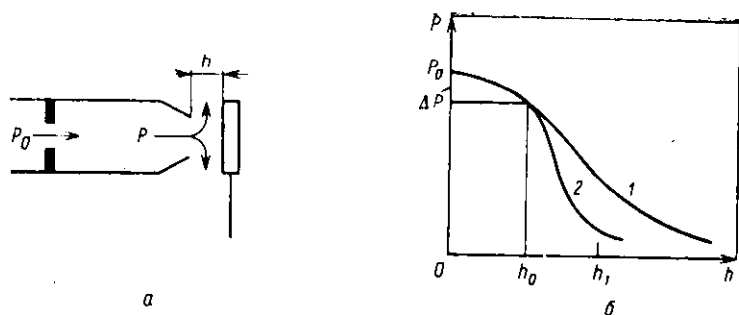


Рис. 1.14. Преобразователь перемещения в давление типа сопло — заслонка:

а — принципиальная схема; б — статическая характеристика; 1 — преобразователь с постоянным давлением P_0 ; 2 — преобразователь с постоянным перепадом $\Delta P = P_0 - P$.

постоянный дроссель, проточная камера небольшого объема и переменный дроссель, построенный на пневматическом сопле и заслонке. Перемещения заслонки h приводят к изменению гидравлического сопротивления вытекающей из сопла струи и соответственно — давления P в камере. При удалении заслонки от сопла на 0.15—0.20 мм давление P становится равным нулю.

Статическая характеристика преобразователя показана на рис. 1.14, б. Как следует из ее анализа, коэффициент усиления преобразователя $k_p = dP/dh$ зависит от перемещения h , что сказывается на точности и чувствительности устройств и приборов, содержащих преобразователь сопло — заслонка. Хотя значения k_p относительно велики (порядка 10^6 Па/мм), однако при использовании подобных преобразователей в усилителях давления и мощности такие коэффициенты усиления недостаточны. Для увеличения k_p и линеаризации статической характеристики применяют ряд усовершенствований преобразователя; одно из них рассмотрено ниже.

Описанный преобразователь не имеет обратной связи, поэтому плохо работает при перекосах заслонки, вибрациях, колебаниях давления воздуха и т. п.

Наибольшее распространение в пневмоавтоматике получил преобразователь перемещения в давление с отрицательной обратной связью (рис. 1.15, а). Он состоит из проточной камеры с постоянным и переменным дросселем, сильфона обратной связи и механического рычага — сумматора перемещений. Рассмотрим его работу.

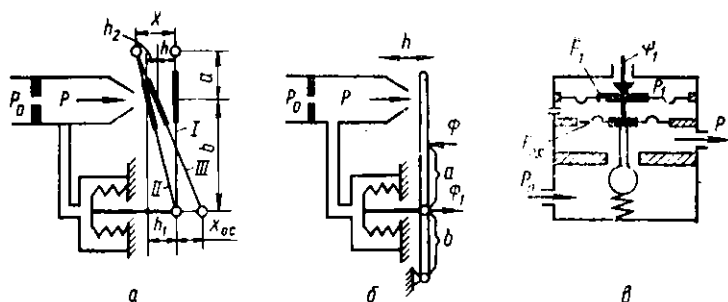


Рис. 1.15. Принципиальные схемы преобразователей с обратной связью:

а — перемещения в давление; *б* — силы в давление; *в* — силы в давление (типа шарик — седло).

Пусть заслонка преобразователя, закрепленная на рычаге *A*, находится в положении *I*. При перемещении влево верхнего конца рычага на величину *x* (положение *II*) расстояние между соплом и заслонкой уменьшится на *h*₁, что вызовет рост давления *P* в камере и сжатие сильфона на величину *x*_{0с}. Заслонка займет положение *III*, расстояние ее от сопла увеличится на *h*₂. Результирующее перемещение составит *h* = *h*₁ − *h*₂. Используя уравнения сумматора перемещений (1.7) и сильфона (1.5) при *P*₂ = 0, получим линейное уравнение статики преобразователя:

$$P = k_c b x / F_3 a - k_c (a + b) h / F_3 a$$

Величина *h* обычно мала (не более 0,08 мм), поэтому можно принять $P \approx k_c b x / F_3 a$. Структурная схема преобразователя с отрицательной обратной связью приведена на рис. 1.16, *а*. Передаточные функции $W_0(s) = h_1(s)/x(s) = b/(a + b)$, $W_3(s) = a(a + b)$ реализуются рычагом *A*, вращающимся вокруг двух опор. Передаточная функция $W_1(s) = P_1(s)/h(s) = k_1/(T_1 s + 1)$ описывает динамику проточной камеры. Отметим, что в данном слу-

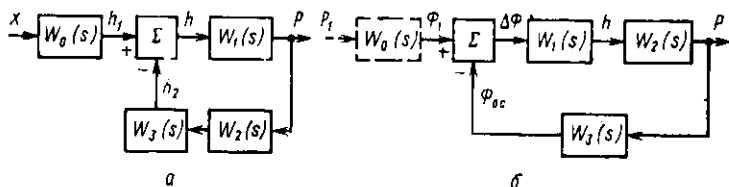


Рис. 1.16. Структурные схемы преобразователей с обратной связью: *а* — перемещения в давление; *б* — силы в давление.

чае $k_1 \gg 1$ и имеет размерность Па/мм. Динамические свойства сильфона заданы передаточной функцией $W_2(s) \approx k_2 = F_0/k_c$.

Передаточная функция всего преобразователя имеет вид:

$$W(s) = \frac{W_0(s) W_1(s)}{1 + W_1(s) W_2(s) W_3(s)} = \frac{bk_1}{(a+b)(T_1s+1) + ak_1k_2}$$

Учитывая, что объем V проточной камеры мал, а постоянная времени T_1 составляет сотые доли секунды, можно пренебречь переходными процессами в преобразователе. При $T_1=0$ и $k_1 \gg 1$ передаточная функция преобразователя упрощается: $W(s) \approx bk_c/aF_0$. Иными словами, в области низких частот преобразователь можно рассматривать как усилительное звено.

Принципиальная схема преобразователя силы в давление приведена на рис. 1.15, б. Преобразователь состоит из проточной камеры с постоянным и переменным (типа сопло — заслонка) дросселями, сильфона обратной связи и рычажного преобразователя усилий в перемещение. При равновесном состоянии заслонки выполняется условие $(a+b)\Phi = b\Phi_1$. Но $\Phi_1 = PF_0$, поэтому $P = (a+b)\Phi/bF_0$. При малых частотах ω преобразователь можно считать усилительным звеном с $W(s) \approx (a+b)/bF_0$.

На рис. 1.15, в показана схема преобразователя силы (или перемещения) в давление, базирующегося на переменном дросселе типа шарик — седло (шарик — цилиндр). Сила Φ_1 создается давлением P_1 , действующим на «вялую» мембрану. На нижнюю мембрану обратной связи эффективной площадью $F_{0.c}$ действует выходное давление P . Под действием разности сил $\Delta\Phi = \Phi_1 - PF_{0.c}$ шарик перемещается, и выходное давление P изменяется до тех пор, пока не будет выполнено условие равновесия сил $\Phi_1 = PF_{0.c}$.

Структурная схема шарикового преобразователя показана на рис. 1.16, б. Передаточная функция $W_1(s) = h(s)/\Delta\Phi(s) \approx k_1$ описывает динамику мембранного узла и шарика (без учета действия поддерживающей пружины). Проточная камера с постоянным и переменным дросселями задается функцией $W_2(s) = k_2/(T_2s+1)$. Для нижней мембраны обратной связи выполняется условие $W_3(s) = F_{0.c}$. При $k_1k_2 \gg 1$ и малом объеме проточной камеры получаем передаточную функцию преобразователя шарикового типа [без учета звена с функцией $W_0(s)$]: $W(s) = P(s)/\Phi_1(s) \approx 1/F_{0.c}$.

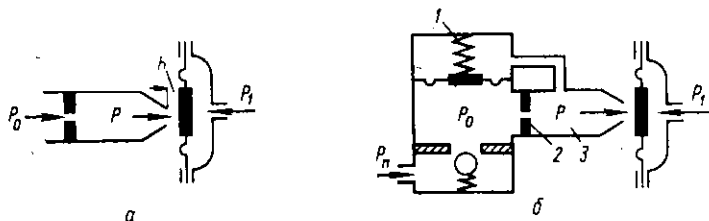


Рис. 1.17. Принципиальные схемы усилителей давления типа сопло — заслонка:

а — с постоянным давлением P_0 ; б — с постоянным перепадом $\Delta P = P_0 - P$; 1 — пружина; 2 — дроссель; 3 — проточная камера.

Преобразователи шарикового типа применяют для построения усилителей давления и (чаще) мощности (расхода) пневматических сигналов.

Усилители давления

К этому классу составных элементов относятся рассмотренные выше преобразователи силы (перемещения) в давление; сила Φ (перемещение h) в них создается с помощью некоторого входного давления P_1 . Такие элементы строятся, как правило, на основе переменных дросселей.

Усилитель давления с дросселем шарик — седло показан на рис. 1.15, в. Сила Φ здесь создается давлением P_1 , действующим на «вялую» мембрану эффективной площадью F_1 с малой собственной жесткостью (упругостью), т. е. $\Phi_1 = P_1 F_1$. Передаточная функция усилителя $W(s) = P(s)/P_1(s) \approx F_1/F_{0,c} = k_{ш}$. Ее легко получить из уравнения (1.12) подстановкой $\Phi_1(s) = P_1(s)F_1$ с учетом в структурной схеме усилителя (рис. 1.16, б) звена с передаточной функцией $W_0(s) = \Phi_1(s)/P_1(s) = F_1$ (изображено пунктиром). Коэффициент передачи $k_{ш}$ шарикового усилителя равен отношению площадей верхней и нижней мембран. Такие элементы не получили широкого применения для усиления давления.

Простейший усилитель давления на базе переменного дросселя сопло — заслонка показан на рис. 1.17, а. Заслонка дросселя закреплена на жестком центре мембраны, которая перемещается при изменении входного давления P_1 . Статическая характеристика усилителя нелинейна; если каждому значению входного давления P_1 сопоставить определенное перемещение заслонки h , то она полностью аналогична характеристике преобразователя перемещения в давление (рис. 1.14, б). Коэффици-

ент усиления $k = dP/dP_1$ зависит от входного давления P_1 (или h) и в общем случае невелик, что затрудняет использование таких усилителей в пневмоавтоматике. Одна из причин недостаточной крутизны статической характеристики — изменение перепада $\Delta P = P_0 - P$ при перемещении заслонки. Так, с увеличением h давление P в камере уменьшается, перепад ΔP при этом возрастает, расход воздуха через постоянный дроссель увеличивается и замедляет падение P , т. е. статическая характеристика становится более пологой. Для устранения этого недостатка усилители часто снабжают дополнительным устройством стабилизации перепада давления на постоянном дросселе (рис. 1.17, б). Такой усилитель работает следующим образом.

Равновесное состояние мембраны эффективной площадью F_0 и шарика возможно при выполнении равенства $F_0 P + \Phi_{\text{пр}} = P_0 F_0$ (где $\Phi_{\text{пр}}$ — сила, развиваемая пружиной 1; $P = P_0 - \Delta P$; ΔP — перепад давления на дросселе 2). При перемещении заслонки вправо давление P в камере 3 понизится, а перепад ΔP возрастет. Для достижения нового равновесия необходимо на столько же понизить давление P_0 , увеличив гидравлическое сопротивление в переменном дросселе шарик — седло. Перепад ΔP примет заданное значение, а крутизна статической характеристики усилителя с постоянным перепадом будет больше, чем крутизна характеристики обычного усилителя. Действительно, в рассматриваемом случае давление P понижается только в результате перемещения заслонки, а расход воздуха через постоянный дроссель остается неизменным. В обычном же усилителе понижение P ведет к росту ΔP и увеличению расхода воздуха через постоянный дроссель, что способствует возрастанию давления в камере. На рис. 1.14, б показана статическая характеристика усилителя с постоянным перепадом ΔP (кривая 2). При малых h кривые 1 и 2 отличаются мало; начиная с некоторого значения h_0 , являющегося корнем уравнения $P(0) - P(h_0) = \Delta P$, величина $\Delta P \approx \text{const}$. В качестве рабочего участка статической характеристики усилителя берут интервал $[h_0, h_1]$.

В некоторых случаях применяют устройства для поддержания постоянного перепада на переменном дросселе. При этом вся статическая характеристика смещается вправо по оси абсцисс, что уменьшает вероятность засорения сопла при малых перемещениях заслонки.

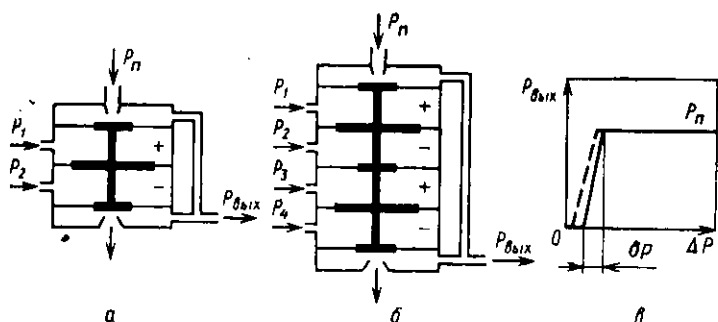


Рис. 1.18. Мембранные двухсопловые усилители давления:
 а, б — принципиальные схемы двухвходового и четырехвходового усилителя;
 в — статическая характеристика усилителя.

В промышленной пневмоавтоматике широко применяют *мембранные двухсопловые усилители давления* (рис. 1.18, а, б). Они состоят из двух одинаковых переменных дросселей типа сопло — заслонка и мембранного блока, осуществляющего суммирование сил, создаваемых давлениями P_1 и P_2 или $P_1—P_4$ (для двух- или четырехвходовых усилителей). Переменные дроссели включены последовательно, причем увеличение пневматического сопротивления одного из них вызывает уменьшение сопротивления другого. Такая конструкция усложняет настройку элемента, но увеличивает его чувствительность и коэффициент усиления. В динамическом отношении усилители можно считать безынерционными звеньями. Этому способствуют малые объемы двух проточных и двух (или четырех) глухих камер, а также отсутствие постоянных дросселей на их вводах. Статические характеристики двухсопловых усилителей близки к характеристикам релейных элементов и имеют небольшой интервал линейности δP . Статическая характеристика усилителя показана на рис. 1.18, в, где $\Delta P = P_1 - P_2$ или $\Delta P = P_1 - P_2 + P_3 - P_4$.

Двухвходовой усилитель на участке линейности δP работает следующим образом. Определим приложенную к мембранному блоку результирующую силу $\Delta \Phi$, условно считая направление действия ее (или вызвавшего ее давления) положительным, если давление воздуха на выходе усилителя увеличивается:

$$\Delta \Phi = P_{\text{вых}}f + P_1F + P_2f - P_{\text{вых}}f - P_1f - P_2F = (F - f)(P_1 - P_2)$$

где F, f — эффективные площади большой и малой мембран. При $\Delta\Phi=0$ мембранный блок находится в равновесии и на выходе усилителя имеется некоторое давление $P_{\text{вых}}$. При $\Delta\Phi \neq 0$, например при $\Delta\Phi > 0$, мембранный блок будет перемещаться вниз, увеличивая проводимость верхнего дросселя и уменьшая проводимость нижнего, соединяющего выход усилителя с атмосферой. Если $\Delta\Phi$ мало, то с учетом небольшой собственной жесткости «вялых» мембран возможно наступление нового равновесия мембранного блока; тогда на выходе усилителя установится новое давление. В первом приближении давление $P_{\text{вых}}$ будет изменяться пропорционально перемещению мембранного блока и разбалансу усилий $\Delta\Phi$:

$$P_{\text{вых}} \approx C\Delta\Phi = C(F-f)P_1 - P_2) = k\Delta P$$

Коэффициент C зависит от жесткости и числа мембран. Как уже указывалось, «вялые» мембраны обладают малой собственной жесткостью, поэтому интервал изменения разбаланса сил $\Delta\Phi$ (и соответствующий ему интервал «разбаланса» давлений δP), при котором еще возможно равновесие мембранного блока, мал — примерно 150—200 Па. При $\Delta P \geq \delta P$ мембранный блок займет одно из крайних положений, и давление на выходе усилителя будет равно $1,4 \cdot 10^5$ Па или 0. Коэффициент усиления k на участке линейности δP равен 600—700. Обычно статические характеристики усилителя имеют небольшой гистерезис, зона которого зависит от числа мембран и их жесткости (на рис. 1.18, в гистерезисная ветвь характеристики показана пунктиром).

Рассуждая аналогично, можно получить и уравнения статики четырехходового усилителя давления: $P_{\text{вых}} = k(P_1 - P_2 + P_3 - P_4)$. Для него $k \approx 300$ —350, а интервал линейности $\delta P = 300$ —400 Па.

Рассмотренные усилители давления не имеют обратной связи, их применяют в различных устройствах пневмоавтоматики как составные части. Самостоятельную роль усилитель давления без обратной связи играет при реализации элемента сравнения (см. раздел 1.3).

Усилители мощности

Под мощностью пневматического сигнала понимают произведение расхода воздуха G на его давление P . Усилители мощности предназначены для одновременного усиления давления и расхода. Наиболее распространенные

в пневмоавтоматике усилители мощности осуществляют усиление расхода, сохраняя давление воздуха практически неизменным. Динамику таких усилителей описывают двумя передаточными функциями:

$$W_P(s) = P_{\text{вых}}(s)/P_{\text{вх}}(s) \approx k_P \approx 1, \quad W_G(s) = G_{\text{вых}}(s)/G_{\text{вх}}(s) \approx k_G \gg 1$$

Одна из них характеризует усиление по давлению, вторая — по расходу.

Усилителем мощности может служить изображенный на рис. 1.15, в шариковый преобразователь силы в давление, если принять равными эффективные площади мембран. Тогда $W_P(s) = k_P = 1$, а коэффициент усиления $k_G = \infty$, так как входной сигнал давлением $P_{\text{вх}}$ поступает в глухую камеру, и установившийся расход $G_{\text{вх}} = 0$.

На рис. 1.19 показан усилитель мощности на базе переменного дросселя сопло — заслонка. Входной сигнал поступает в верхнюю глухую камеру относительно малого объема; нижняя проточная камера соединяется с атмосферой переменным дросселем сопло — заслонка. При увеличении $P_{\text{вх}}$ возрастает сила $\Phi_{\text{вх}} = P_{\text{вх}}F_3$, действующая на мембрану; сопло прикрывается, давление $P_{\text{вых}}$ и сила $\Phi_{\text{о.с}} = P_{\text{вых}}F_3$ возрастают до тех пор, пока не наступит равновесие сил $P_{\text{вх}}F_3 = P_{\text{вых}}F_3$, т. е. $P_{\text{вых}}$ станет равным $P_{\text{вх}}$.

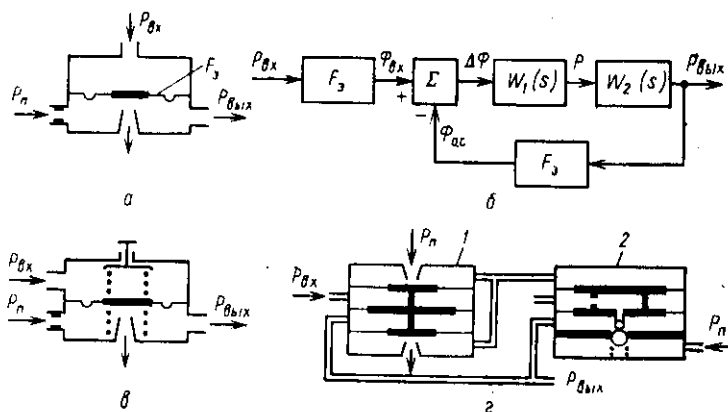


Рис. 1.19. Усилители мощности (повторители давления):

а — принципиальная схема; б — структурная схема; в — принципиальная схема повторителя со сдвигом; г — принципиальная схема точного мощного повторителя (1 — усилитель давления; 2 — грубый мощный повторитель).

В структурной схеме передаточная функция $W_1(s) \approx \approx k_1$ характеризует переменный дроссель, функция $W_2(s) = k_2/(T_2s + 1)$ описывает динамику проточной камеры с пренебрежимо малой постоянной времени T_2 . Передаточная функция усилителя по давлению имеет вид:

$$W_P(s) = P_{\text{вых}}(s)/P_{\text{вх}}(s) = F_3 k_1 k_2 / (1 + F_3 k_1 k_2) \approx 1$$

так как $F_3 k_1 k_2 \gg 1$.

Коэффициент усиления $k_G = \infty$.

Усилители мощности с передаточными функциями $W_P(s) = 1$ и $W_G(s) = \infty$ называют *повторителями давления*, так как в них выходной сигнал $P_{\text{вых}}$ повторяет входной.

В ряде устройств пневмоавтоматики требуется, чтобы $P_{\text{вых}}$ отличалось от $P_{\text{вх}}$ на некоторую заданную величину $\pm \Delta$. В таких повторителях со сдвигом нужно смещение $\pm \Delta$ создается пружинами, устанавливаемыми в нижней и верхней камерах (см. рис. 1.19, в). В серийных повторителях со сдвигом $\Delta = +0,15 \cdot 10^5$ Па.

Усилители мощности (повторители) применяют для ослабления влияния паразитных емкостей и запаздываний сигналов в длинных пневмопроводах и пневмокамерах большого объема, для разделения некоторых элементов в сложных устройствах. В зависимости от расхода их классифицируют на маломощные (точные) и мощные (обычно грубые). В маломощных повторителях (см. рис. 1.19, а) используют постоянный дроссель на вводе питания в камеру. Относительная максимальная погрешность воспроизведения давления составляет 0,25%, расход воздуха $G_{\text{вых}}$ невелик. В мощных повторителях используют дроссель типа шарик — седло или сопло — заслонка с большим проходным сечением; на вводе питания отсутствует постоянный дроссель. И то, и другое позволяет в несколько раз увеличить расход воздуха $G_{\text{вых}}$ по сравнению с расходом в маломощном повторителе. Коэффициент усиления k_p грубого повторителя может изменяться в интервале 0,95—1,05.

В том случае, когда нужен точный мощный повторитель, его собирают (см. рис. 1.19, г) на базе усилителя давления 1 ($k \gg 1$) и грубого мощного повторителя 2 ($k_1 \approx 1$). Для стабилизации коэффициента усиления указанные элементы охватывают единичной отрицательной обратной связью. Передаточная функция повторителя: $W(s) = P_{\text{вых}}(s)/P_{\text{вх}}(s) = k k_1 / (1 + k k_1) \approx 1$.

Мембранные сумматоры

Мембранные сумматоры (рис. 1.20) предназначены для достаточно точного суммирования и вычитания давлений и строятся на базе двух- и четырехвходовых усилителей давления с большими коэффициентами передачи. Особенностью сумматоров является охват усилителей давления отрицательной единичной обратной связью, вводимой в камеру Б. В статике обеспечивается баланс действующих сил (с учетом их знаков):

$$P_1(F-f) - P_2(F-f) + P_3(F-f) - P_{\text{вых}}(F-f) + P_{\text{вых}}f - P_{\text{вых}}f = 0$$

Отсюда $P_{\text{вых}} = P_1 - P_2 + P_3$.

В структурной схеме сумматора передаточные функции $W_j(s) = F - f$ ($j=1-4$) реализуются мембранами эффективной площадью F и f ; собственно сумматор — мембранным блоком (знаки действующих сил определяются соответствующими «знаками» камер усилителя); усилитель давления с $W_5(s) = k_5 \gg 1$ — двумя последовательно включенными дросселями типа сопло — заслонка; динамика проточной камеры с малой постоянной вре-

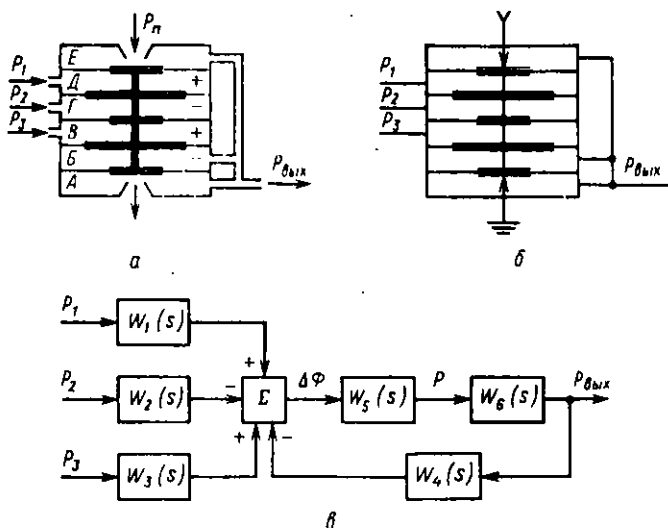


Рис. 1.20. Мембранный сумматор:

а — принципиальная схема; б — условное обозначение принципиальной схемы; в — структурная схема.

мени T_0 описывается передаточной функцией $W_6(s) = k_6/(T_6s + 1)$. Передаточная функция по любому входу, например по P_1 , такова:

$$W(s) = P_{\text{вых}}(s)/P_1(s) = (F - f) k_0 k_6 / [1 - (F - f) k_0 k_6] \approx 1$$

ибо $(F - f) k_0 k_6 \gg 1$.

Благодаря отрицательной обратной связи стабилизируется работа сумматора и повышается его точность; погрешность такого элемента менее одного процента.

Для упрощения изображения принципиальных схем устройств пневмоавтоматики приняты следующие условные обозначения отдельных элементов и узлов:

Элемент, узел	Условное обозначение
<i>Дроссели</i>	
<i>постоянный</i>	
<i>регулируемый</i>	
<i>переменный (сопло-заслонка)</i>	
<i>Сопло</i>	
<i>Узел ввода питания</i>	
<i>Узел вывода воздуха в атмосферу</i>	
<i>Мембрана с жестким центром</i>	
<i>Камеры</i>	
<i>проточная</i>	
<i>глухая</i>	
<i>Сумматор давлений (усилий)</i>	
<i>Усилитель давления</i>	
<i>Повторители</i>	
<i>точный (маломощный)</i>	
<i>точный (мощный)</i>	
<i>грубый (мощный)</i>	
<i>Подпоры*</i>	
<i>малый (0,4 · 10⁵ Па)</i>	
<i>большой (0,8 · 10⁵ Па)</i>	

* Подпоры — это постоянные давления воздуха, вводимые в камеры элементов. Подпоры выполняют функции пружин и обеспечивают определенное положение мембранных блоков при отсутствии входных сигналов.

Интегратор

Для построения интегратора с передаточной функцией $W(s) = 1/T_1 s$ применяют аperiodическое звено с передаточной функцией $W_1(s) = (T_1 s + 1)^{-1}$, охваченное единичной положительной обратной связью (рис. 1.21, а). Получим:

$$W(s) = \frac{P_{\text{вых}}(s)}{P_{\text{вх}}(s)} = \frac{(T_1 s + 1)^{-1}}{1 - (T_1 s + 1)^{-1}} = \frac{1}{T_1 s} \quad (1.12)$$

Для интегрирования знакопеременных сигналов на вход интегратора подают опорное (начальное) давление P_0 ; на выходе получают

$$P_{\text{вых}}(t) - P_{\text{вых}}(0) = \frac{1}{T_1} \int_0^t [P_{\text{вх}}(\tau) - P_0] d\tau$$

Принципиальная и детальная структурная схемы интегратора, построенного на базе пятимембранного сумматора, приведены на рис. 1.21, б, в. Усилительные звенья с коэффициентами передачи $F-f$ реализованы с помощью мембран в камерах В, Г, Д; сумматор давлений (на схеме обведен пунктирной линией) строится путем охвата усилителя давления с $k \gg 1$ отрицательной обратной связью, вводимой в камеру Б. Аperiodическое дросселя D_1 , который позволяет изменять проводимость $T_1 = V/R_0 a_1$. По-

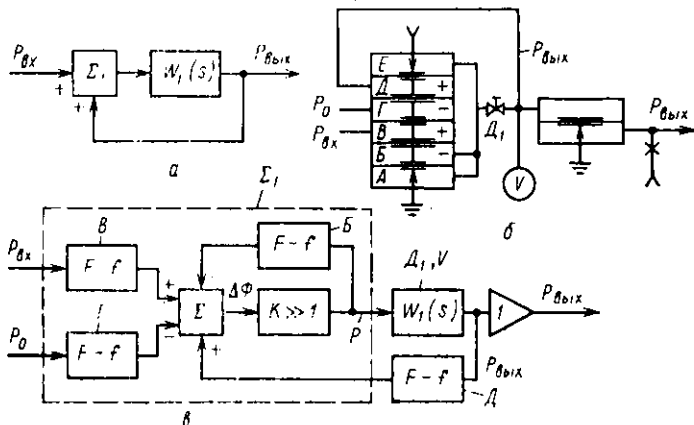


Рис. 1.21. Схемы интегратора:

а — структурная упрощенная; б — принципиальная; в — структурная детальная.

ложительная обратная связь создается подводом давления $P_{\text{вых}}$ в камеру D сумматора. В схему включен точный повторитель для устранения влияния нагрузок на работу интегратора и создания глухой камеры.

Устройства предварения и дифференцирования

При автоматизации инерционных объектов с малыми транспортными запаздываниями иногда используют ПД или ПИД-регуляторы, в состав которых входит устройство идеального предварения с передаточной функцией $W(s) = T_1 s + 1$. Для построения такого устройства следует усилитель давления с $k \gg 1$ охватить отрицательной обратной связью с включенным в нее апериодическим звеном (рис. 1.22, а). Выходом устройства предварения является сигнал P_1 . Получим:

$$W(s) = \frac{P_1(s)}{P_{\text{вх}}(s)} = \frac{k}{1 + k/(T_1 s + 1)} \approx T_1 s + 1 \quad (1.13)$$

Устройство предварения можно построить на базе пьезомембранного усилителя давления и глухой камеры с регулируемым дросселем D_1 для изменения постоянной времени T_1 . Принципиальная схема такого устройства на

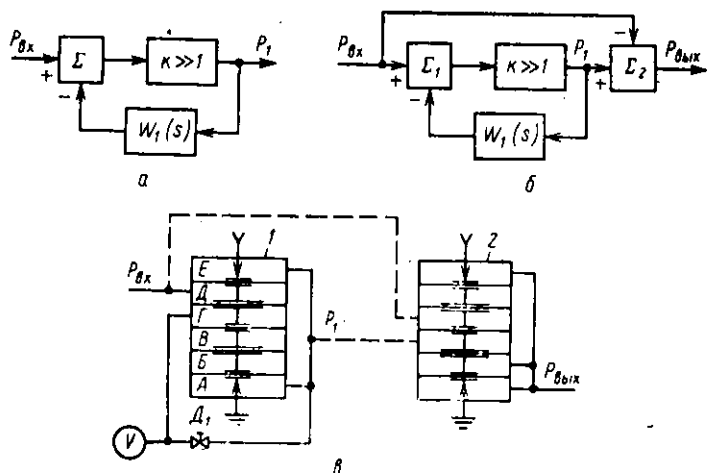
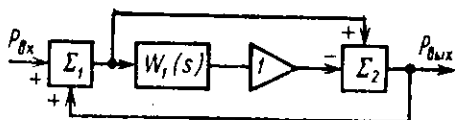


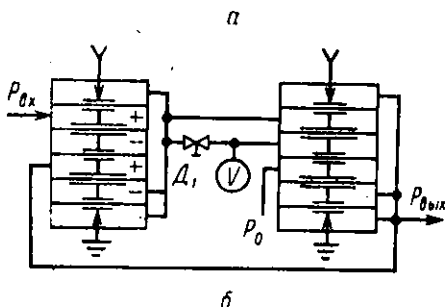
Рис. 1.22. Устройство предварения и дифференциатор с отрицательной обратной связью:

а, б — структурные схемы устройства предварения и дифференциатора; в — принципиальная схема устройства предварения и дифференциатора (1 — усилитель давления; 2 — сумматор).

Рис. 1.23. Структурная (а) и принципиальная (б) схемы дифференциатора с положительной обратной связью.



базе усилителя 1 показана на рис. 1.22, в. Выходным сигналом служит давление P_1 (пунктирные линии не относятся к устройству предварения). В ряде случаев усилитель давления может работать как



двухпозиционное реле; тогда в схеме возникают автоколебания, для устранения которых вводят дополнительные обратные связи по давлению (на рис. не показаны): отрицательную в камеру В, положительную — через постоянный дроссель в камеру В.

Идеальный дифференциатор с передаточной функцией $W(s) = T_1 s$ легко получить, добавив к устройству предварения сумматор Σ_2 для вычитания $P_{вх}$ (рис. 1.2, б). На выходе сумматора $P_{вых}(s) = P_1(s) - P_{вх}(s)$. Учитывая, что $P_1(s) = P_{вх}(s)/(T_1 s + 1)$, получим $P_{вых}(s) = P_{вх}(s) T_1 s$ или $W(s) = P_{вых}(s)/P_{вх}(s) = T_1 s$. Принципиальная схема такого дифференциатора показана на рис. 1.22, в. Помимо пятимембранного усилителя 1, на котором реализовано устройство предварения, в него входит сумматор 2 (линии связи его с блоком предварения показаны пунктиром).

В ряде случаев дифференциатор строят на базе апериодического звена, охваченного положительной обратной связью (рис. 1.23). Такая схема содержит два сумматора, пневматическую камеру с регулируемым дросселем и точный мощный повторитель для разделения глухой камеры и линии нагрузки. На принципиальной схеме повторитель не показан. В сумматор Σ_2 введено опорное давление P_0 , что позволяет получать и «отрицательные» значения производных. Передаточная функция всего устройства такова:

$$W(s) = P_{вых}(s)/P_{вх}(s) = [1 - (T_1 s + 1)^{-1}] / [1 - (1 - (T_1 s + 1)^{-1})] = T_1 s$$

Существует и ряд других, более простых, но менее точных схем дифференцирования давления $P_{\text{вх}}$. Передаточные функции рассмотренных устройств отличаются от передаточной функции идеального дифференциатора.

1.3. ДИСКРЕТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УЗЛЫ

Элементы называют дискретными, если используемые в них пневматические сигналы квантованы (дискретизированы) по времени или по уровню, или же одновременно по времени и по уровню.

Дискретизация какой-либо функции по времени — это выделение ее значений в заранее фиксированные моменты времени. Элементы, в которых используется такой сигнал, называют импульсными.

Дискретизация по уровню заключается в выделении значений сигнала при достижении им заранее определенных уровней, отстоящих друг от друга на интервал квантования. Устройства, осуществляющие квантование по уровню, называют релейными. Обычно число уровней равно двум или трем, соответственно различают двух- и трехпозиционные релейные элементы.

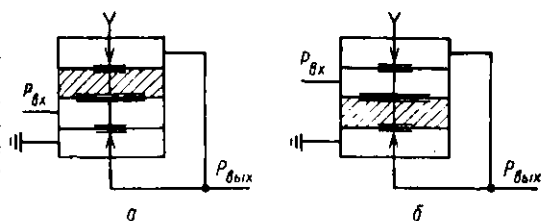
Дискретизация функции по времени и по уровню — выделение в фиксированные моменты времени значений сигнала и округление их до ближайшего уровня. Такую дискретизацию используют в цифровых элементах и устройствах.

Из перечисленных типов дискретных элементов наибольшее распространение в пневмоавтоматике получили двухпозиционные релейные элементы (реле) и построенные на их основе узлы и схемы. Пневматический сигнал на выходе может быть равен 0 или 1; первому значению соответствует атмосферное давление, второму — давление питания, равное $1,4 \cdot 10^5$ Па.

Двухпозиционные релейные элементы

К двухпозиционным относится упоминавшийся в разделе 1.2 элемент сравнения ряда непрерывных сигналов, реализуемый на двух- или четырехходовом усилителе давления (см. рис. 1.18). Идеализированная статическая характеристика его такова: $P = P_n = 1$ при $\Delta P > 0$; $P = 0$ при $\Delta P < 0$, где P_n — давление питания; $\Delta P = P_1 - P_2$ или $\Delta P = P_1 - P_2 + P_3 - P_4$. Элемент с такой характеристикой

Рис. 1.24. Принципиальные схемы двухпозиционных реле отрицания (а) и повторения (б) на базе трехмембранных элементов.

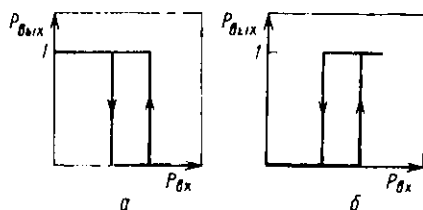


называют *сигнум-реле*, подчеркивая тем самым, что переключения его осуществляются при смене знака функции ΔP . В отличие от усилителя давления, в сигнум-реле стремятся обеспечить как можно меньшую зону линейности δP и приблизить статическую характеристику к началу координат.

Применяемые в пневмоавтоматике двухпозиционные реле работают либо на непрерывных, либо (преимущественно) на дискретных входных сигналах. Эти реле конструируют на базе различных пневмоэлементов. В качестве примера рассмотрим реле на базе трех- и одномембранных элементов.

Трехмембранное реле (рис. 1.24) имеет 6 вводов. Один ввод предназначен для подвода питания, второй — для связи камер с атмосферой, третий — для ввода непрерывного или дискретного входного сигнала, четвертый — для подвода постоянного давления подпора $P_{\text{под}}$ выполняющего функцию пружины и обеспечивающего нужную форму статической характеристики. Наконец, два последних ввода позволяют создавать положительную обратную связь и измерять выходное давление $P_{\text{вых}}$, равное нулю или единице. Статические характеристики трехмембранных реле с малым подпором (*реле отрицания*) и с большим подпором (*реле повторения*) приведены на рис. 1.25. Для них характерно наличие большой зоны гистерезиса и смещенность характеристики от начала координат, что позволяет существенно

Рис. 1.25. Статические характеристики двухпозиционных реле отрицания (а) и повторения (б).



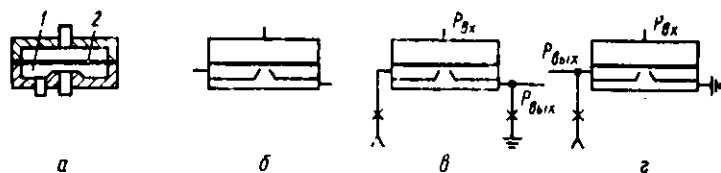


Рис. 1.26. Одномембранные элемент и реле:

а — принципиальная схема элемента (1 — проточная камера; 2 — мембрана); б — условное обозначение элемента; в, г — принципиальные схемы реле отрицания и повторения.

упростить и заглубить конструкцию реле (по сравнению с усилителями давления и сигнум-реле), а также заметно повысить их надежность.

Принципиальная схема и условное обозначение одномембранного элемента показаны на рис. 1.26. Элемент имеет три ввода: через верхний подводится дискретный (реле — непрерывный) сигнал $P_{вх}$, два нижних расположены в проточной камере 1 и могут быть разобщены (закрыты) мембраной 2. Для получения реле с нужными статическими характеристиками на нижних вводах устанавливают один или два постоянных дросселя (рис. 1.26, в, г). Эти реле непрерывно расходуют сжатый воздух и достаточно инерционны из-за наличия в них проточной камеры с дросселями.

К числу наиболее ненадежных элементов пневмоавтоматики относятся эластичные мембраны, поскольку в процессе их эксплуатации образуются трещины и разрывы в местах заделки жесткого центра и крепления полотна между фланцами. Для повышения надежности реле-ных элементов используют так называемые *свободные мембраны*. Принципиальная схема и условные обозначения элемента со свободной мембраной приведены на рис. 1.27. Собственно мембрана выполняется жесткой (из металла, пластмассы и т. п.) и свободно перемещается в камере 2 малого объема под действием силы тяжести и усилия, создаваемого давлением в верхней или нижней,

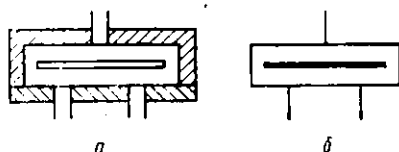


Рис. 1.27. Принципиальная схема (а) и условное обозначение (б) элемента со свободной мембраной.

половине камеры. Элемент имеет три ввода: верхний служит для подвода входного сигнала $P_{вх}$, нижние могут быть соединены или разобщены мембраной. Для создания реле с нужной статической характеристикой нижние вводы через постоянные дроссели соединяют с источником питания или атмосферой. Принцип действия и характеристики этого элемента и одномембранного реле одинаковы. Реле со свободной мембраной обладает высокой надежностью и малой инерционностью (объем проточной камеры меньше, чем в одномембранном элементе). Реле неэкономично, так как через него постоянно протекает сжатый воздух.

Элементы памяти непрерывных и дискретных сигналов

Эти элементы предназначены для запоминания непрерывного ($P_{вх}(t)$) или дискретного ($P_{вх}=0$ или 1) сигнала по команде $P_{к}=1$, подаваемой каким-либо другим устройством в произвольный момент времени t_k . По команде $P_{к}=0$ запомненные ранее значения $P_{вх}$ «забываются», и выходной сигнал повторяет входной. Оба элемента реализуются на трехмембранных реле.

Элемент памяти непрерывных сигналов показан на рис. 1.28. Он состоит из трехмембранного реле с малым подпором и повторителя давления, входной канал которого может закрываться жестким центром мембранного блока реле. Подпор нужен для того, чтобы при $P_{к}=0$ мембранный блок занимал определенное положение. Принцип работы элемента прост: при $P_{к}=0$ сигнал $P_{вх}$ проходит в камеру Б, при этом сигнал на выходе повторителя $P_{вых}(t) \equiv P_{вх}(t)$. При подаче в момент времени

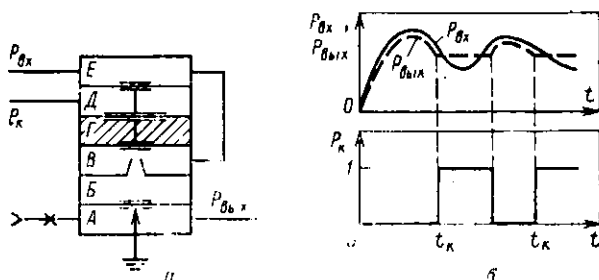


Рис. 1.28. Принципиальная схема (а) и график работы (б) элемента памяти непрерывных сигналов.

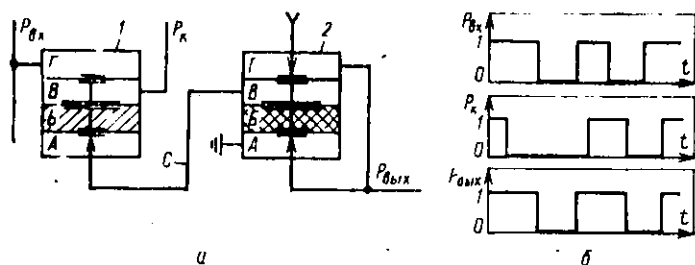


Рис. 1.29. Элемент памяти дискретных сигналов:

a — принципиальная схема; *б* — график работы; 1 — реле; 2 — реле-повторитель.

t_k команды $P_k=1$ мембранный блок перемещается вниз и закрывает камеру *B*, в которой «запоминается» давление $P_{вх}(t_k)$; поэтому при $t \geq t_k$ имеем $P_{вых}(t) \equiv P_{вх}(t_k)$.

Элемент памяти дискретных сигналов состоит из последовательно соединенных реле 1 и 2, в камерах *B* которых создают малый и большой подпоры (рис. 1.29). Реле 2 работает как повторитель дискретного сигнала — давления воздуха в камере *B*. При поступлении в произвольный момент времени t_k команды $P_k=1$ («запомнить») закрывается сопло в камере *A* первого реле, и повторитель отрабатывает давление $P_{вх}(t_k)$, запомненное в камере *B*. При подаче команды $P_k=0$ («забыть») оба реле соединяются линией *C*, и $P_{вых}(t) \equiv P_{вх}(t)$.

Пульсирующий дроссель с линейной расходной характеристикой

В разделе 1.1 рассматривались пневматические дроссели, статические характеристики которых можно линеаризовать только при малых перепадах давления — порядка $(0,1-0,3)10^5$ Па. При возрастании перепада расходная характеристика дросселя становится нелинейной, что служит источником систематических погрешностей различных пневматических устройств и приборов. Для повышения их точности применяют пульсирующий дроссель с линейной расходной характеристикой во всем диапазоне изменения перепада давления.

Пульсирующий дроссель строят на базе двух трехмембранных реле, пневмоемкости объемом V , источника командных периодических прямоугольных импульсов ам-

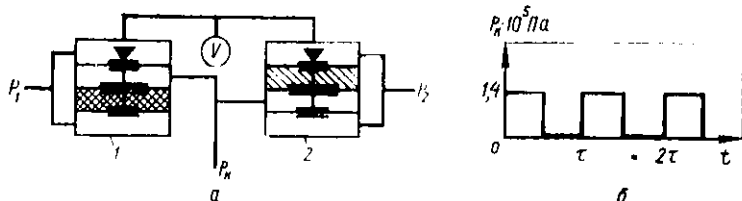


Рис. 1.30. Линейное пульсирующее пневмосопротивление:

a — принципиальная схема; *b* — график изменения P_K ; 1, 2 — пневматические реле.

плитудой $P_K = 1,4 \cdot 10^5$ Па, частотой $f = 1/\tau$, где τ — период (рис. 1.30).

Пульсирующий дроссель работает следующим образом. Командный сигнал $P_K = 1,4 \cdot 10^5$ Па закрывает сопло реле 2 и одновременно открывает сопло реле 1. Сжатый воздух давлением P_1 поступает в течение времени $\tau/2$ в емкость, где аккумулируется масса $M_1 = P_1 V / R\theta$. При $P_K = 0$ открывается сопло реле 1 и закрывается сопло реле 2. За время $\tau/2$ в емкости накапливается воздух давлением P_2 массой $M_2 = P_2 V / R\theta$. За период τ масса воздуха в емкости изменится на величину $\Delta M = M_1 - M_2 = (P_1 - P_2) V / R\theta$. Разделив это равенство на τ и учитывая, что $\Delta M / \tau$ — средний расход G , получим: $G = (P_1 - P_2) V / \tau R\theta = a(P_1 - P_2)$, где проводимость $a = fV / R\theta$. Ее можно изменять заданием той или иной частоты f периодического сигнала P_K , получаемого от специального генератора колебаний.

Реализация логических функций

Логические функции $P_{\text{вых}} = f(P_1, P_2, \dots, P_n)$ устанавливают однозначное соответствие между каждым сочетанием дискретных двоичных переменных $P_1, P_2, \dots, P_n$ и дискретным значением самой функции $P_{\text{вых}}$, равным 0 или 1. Эти соответствия задаются обычно в виде таблицы, причем число возможных сочетаний n аргументов равно $N = 2^n$, а число различных логических функций достигает N^n . Для наиболее распространенных в технике значений $n = 1$ и $n = 2$ общее число различных логических функций равно соответственно 4 и 16. Далеко не все из этих функций имеют практическое применение, более того, часть из них может быть выражена через другие. Последнее обстоятельство имеет важное значение при тех-

нической реализации логических функций средствами пневмоавтоматики.

Из четырех логических функций одной дискретной переменной P_1 наибольший интерес представляют функция отрицания: $P_{\text{вых}}=1$ при $P_1=0$; $P_{\text{вых}}=0$ при $P_1=1$ и функция повторения: $P_{\text{вых}}=0$ при $P_1=0$; $P_{\text{вых}}=1$ при $P_1=1$. Эти функции легко реализуются мембранными элементами, статические характеристики которых приведены на рис. 1.24, а, б или 1.25, б, в.

Из шестнадцати логических функций двух дискретных переменных $P_{\text{вых}}=f(P_1, P_2)$ наиболее часто используют девять функций, приведенных первыми в табл. 1. Следует отметить, что все 16 функций принципиально могут быть получены с помощью двух — конъюнкции и отрицания или дизъюнкции и отрицания. Однако при технической реализации логических функций удобнее оперировать с расширенным набором базисных логических функций — конъюнкции, дизъюнкции, отрицания и иногда — константы (1 или 0).

Таблица 1. Логические функции двух переменных

P_1	0	1	0	1	Название функции	Форма записи функции
P_2	0	0	1	1		
$P_{\text{вых}}$	0	1	1	1	Дизъюнкция (ИЛИ)	$P_{\text{вых}}=P_1 \vee P_2$
$P_{\text{вых}}$	0	0	0	1	Конъюнкция (И)	$P_{\text{вых}}=P_1 \wedge P_2$
$P_{\text{вых}}$	1	0	1	1	Импликация (если, то)	$P_{\text{вых}}=P_1 \rightarrow P_2$
$P_{\text{вых}}$	0	1	0	0	Запрет	$P_{\text{вых}}=P_1 \leftarrow P_2$
$P_{\text{вых}}$	1	0	0	0	Стрелка Пирса	$P_{\text{вых}}=P_1 \downarrow P_2$
$P_{\text{вых}}$	1	1	1	0	Штрих Шеффера	$P_{\text{вых}}=P_1 / P_2$
$P_{\text{вых}}$	1	0	0	1	Эквиваленция	$P_{\text{вых}}=P_1 \sim P_2$
$P_{\text{вых}}$	1	0	1	0	Отрицание (не $\bar{P}_1$)	$P_{\text{вых}}=\bar{P}_1$
$P_{\text{вых}}$	1	1	0	0	Отрицание (не $\bar{P}_2$)	$P_{\text{вых}}=\bar{P}_2$
$P_{\text{вых}}$	0	1	0	1	Повторение (P_1)	$P_{\text{вых}}=P_1$
$P_{\text{вых}}$	0	0	1	1	Повторение (P_2)	$P_{\text{вых}}=P_2$
$P_{\text{вых}}$	1	1	1	1	Константа (1)	$P_{\text{вых}}=1$
$P_{\text{вых}}$	0	0	0	0	Константа (0)	$P_{\text{вых}}=0$

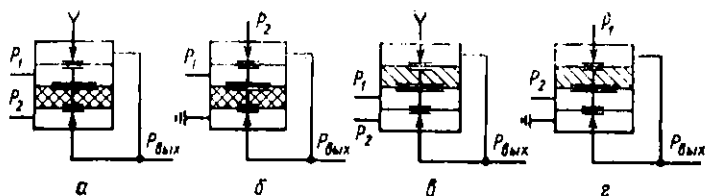


Рис. 1.31. Схемы реализации на трехмембранном реле логических функций двух переменных:

а — дизъюнкции; б — конъюнкции; в — импликации; г — запрета.

Логическая функция дизъюнкции равна 1, когда или $P_1=1$, или $P_2=1$, или $P_1=P_2=1$. Устройства, реализующие функцию дизъюнкции, называют схемами ИЛИ.

Функция конъюнкции равна 1, когда и $P_1=1$, и $P_2=1$; во всех остальных случаях $P_{\text{вых}}=0$. Устройства, реализующие конъюнкцию, называют схемами И.

Импликация — это логическая функция, равная 0 при $P_1=1$ и $P_2=0$. Во всех остальных случаях $P_{\text{вых}}=1$.

Функция запрета представляет собой отрицание импликации, что записывается в такой форме: $P_1 \leftarrow P_2 = \overline{P_1} \rightarrow P_2$, где черта сверху означает операцию отрицания (противоположности). Если переменная $P_2=0$, то функция запрета $P_{\text{вых}}=P_1$; если $P_2=1$, то $P_{\text{вых}}=0$. Схемы реализации перечисленных логических функций на трехмембранном реле показаны на рис. 1.31 (эти функции легко реализуются и на одномембранных реле, и на элементах со свободной мембраной).

Функция «стрелка Пирса» представляет отрицание дизъюнкции и выполняется на элементе ИЛИ и трехмембранном реле отрицания. Если на вход реле отрицания поступает сигнал 1, то $P_{\text{вых}}=0$.

Функция «штрих Шеффера» представляет собой отрицание конъюнкции и реализуется схемой И и элементом отрицания.

Для реализации функции эквиваленции ($P_{\text{вых}}=1$ при $P_1=P_2=1$ или при $P_1=P_2=0$; во всех остальных случаях $P_{\text{вых}}=0$) применяют элементы ИЛИ и И, выходы которых подсоединяют к схеме импликации.

Логические функции отрицания и повторения одной переменной легко реализуются с помощью трехмембранных реле (рис. 1.25).

С помощью нескольких трех- или одномембранных реле можно реализовать и другие логические функции

одной, двух и — в общем случае — n переменных. Например, с помощью двух элементов ПЛИ, двух реле отрицания и дросселя можно построить триггер, являющийся основным узлом современных ЭВМ.

Пневматические элементы логики нашли широкое применение при построении схем блокировок, сигнализаций и управления. Недостатком таких элементов является их низкое быстродействие: полоса частот, обрабатываемых трехмембранным реле, не превышает 50—80 Гц. Это обстоятельство затрудняет применение рассмотренных элементов в цифровых вычислительных устройствах.

1.4. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ И ПРИБОРЫ АГРЕГАТНОЙ УНИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ (АУС)

Агрегатная унифицированная система (АУС) пневматических приборов контроля и регулирования построена по блочному (агрегатному) принципу и состоит из небольшого (около 20) числа блоков, выполняющих самостоятельные функции. Условно все блоки АУС можно разделить на регулирующие (регуляторы типа ПИ, ПД, соотношения и другие), функциональные (для выполнения вычислительных операций суммирования, перемножения, деления, извлечения корня и т. п.), вспомогательные (сигнализаторы, задатчики и др.), вторичные приборы (показывающие, регистрирующие). Все эти блоки совместимы друг с другом по пневматическому сигналу, и из них можно строить более сложные устройства и схемы.

Все блоки АУС за исключением вторичных приборов построены на базе типовых элементов пневмоавтоматики — дросселей, емкостей, мембран, сильфонов и т. п. Каждый блок представляет собой цилиндр, собранный из однотипных шайб, между которыми размещены нежесткие (вялые) мембраны из прорезиненного полотна. Все регулирующие и функциональные блоки АУС построены на принципе компенсации сил, сравнение которых производится на мембранных (отчасти сильфонных) элементах.

В 60-х годах приборы и регуляторы АУС нашли широкое применение при автоматизации химических и смежных производств. К настоящему времени вторичные приборы АУС в основном заменены более надежными (см. раздел 1.5), однако некоторые описанные ниже блоки АУС продолжают эксплуатироваться в промышленности.

Пневматические регуляторы

Наибольшее распространение для автоматизации инерционных объектов получили регуляторы, реализующие следующие теоретические законы:

а) пропорциональный (П)

$$P_{\text{вых}}(t) = C_1 e(t) \text{ или } W(s) = C_1$$

б) пропорционально-интегральный (ПИ)

$$P_{\text{вых}}(t) = C_1 e(t) + C_0 \int_0^t e(\tau) d\tau \text{ или } W(s) = C_1 + C_0/s$$

в) пропорционально-дифференциальный (ПД)

$$P_{\text{вых}}(t) = C_1 e(t) + C_2 \dot{e}(t) \text{ или } W(s) = C_1 + C_2 s$$

г) пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД)

$$P_{\text{вых}}(t) = C_1 e(t) + C_0 \int_0^t e(\tau) d\tau + C_2 \dot{e}(t) \text{ или } W(s) = \\ = C_1 + C_0/s + C_2 s$$

где $e(t) = P_{\text{вх}}(t) - P_z(t)$; $P_{\text{вх}}$ — регулируемая (контрольная) координата объекта; P_z — заданное значение (функция); $P_{\text{вых}}$ — выходная (командная) координата регулятора; C_0 , C_1 , C_2 — параметры настройки регулятора.

Передаточные функции реальных пневматических регуляторов, изучаемых здесь и ниже, отличаются от уравнений динамики теоретических П-, ПИ-, ПД- и ПИД-регуляторов. Однако в области низких частот $[0, \omega_n]$ амплитудно-частотная $A(\omega)$ и фазо-частотная $f(\omega)$ характеристики теоретических и реальных регуляторов с одинаковыми параметрами настроек отличаются незначительно (эти различия частотных характеристик практически не сказываются на качестве переходных процессов замкнутой АСР). Полоса частот $[0, \omega_n]$ получила название *области нормальных режимов* (ОНР) регулятора. Величина ω_n служит числовой характеристикой совершенства динамических свойств реального пневматического регулятора.

Приведем более строгое определение ОНР. Диапазон частот $[0, \omega_n]$, в котором одновременно выполняются неравенства

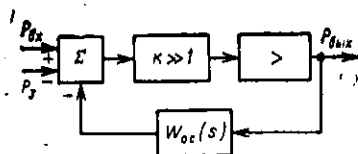


Рис. 1.32. Структурная схема регуляторов АУС.

$$|f(\omega) - f^T(\omega)| < \Delta f \text{ и } |A(\omega) - A^T(\omega)|/A^T(\omega) < \Delta A$$

называют ОНР. Здесь $f(\omega)$, $A^T(\omega)$ — частотные характеристики реального пневматического регулятора с заданными параметрами настройки; $f^T(\omega)$, $A^T(\omega)$ — то же, для теоретического регулятора; Δf , ΔA — константы, зависящие от динамических характеристик класса автоматизируемых объектов; в частности, для низкочастотных объектов химической технологии можно принять $\Delta A = 0,05$; $\Delta f = 5^\circ$. Иногда полагают $\Delta f = 18$, однако при этом средняя квадратичная погрешность переходного процесса в автоматической системе регулирования возрастает примерно на 10%.

Рассмотрим конкретные пневматические регуляторы АУС. Все они построены на принципе компенсации сил и имеют однотипные структурные схемы (рис. 1.32). Каждый регулятор состоит из сумматора давлений (усилий), каскада усилителей (давления и мощности) с общим коэффициентом передачи $k \gg 1$ и устройства отрицательной обратной связи, передаточная функция которого и определяет закон регулирования блока.

Пропорционально-интегральный регулятор 4РБ-32 предназначен для реализации ПИ-закона регулирования:

$$P_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{\delta} e(t) + \frac{1}{\delta T_n} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Передаточная функция этого регулятора имеет вид:

$$W(s) = 1/\delta + 1/\delta T_n s.$$

Здесь δ и T_n — параметры настройки: δ — диапазон дросселирования или предел пропорциональности; $1/\delta$ — коэффициент усиления регулятора; T_n — время изодрома.

На рис. 1.33, а показана принципиальная схема регулятора. Он состоит из сумматора сил (камеры Г, Е, Ж, К и мембранный блок), усилителей давления (сопло-заслонка Д₁ в камере Г) и мощности (переменный дроссель шарик-седло Д₄ в камерах А, Б), устройств обратной связи — отрицательной (камера Г), положитель-

ной (регулируемый дроссель ДД и камера К) и положительной запаздывающей (камеры Н, М, Л, регулируемый дроссель ДИ и переменное пневмосопротивление D_2), а также из выключающего реле (камеры П, О и сопло — заслонка между ними); ДД и ДИ — диапазоны дросселирования и изодрома.

Сумматор сил представляет собой трехмембранное реле, на котором сравниваются усилия, развиваемые давлениями $P_{вх}$ и P_3 , с сигналами обратных связей в камерах Г и К. В камере Г расположен преобразователь усилий в давление, заслонка его перемещается подвижным штоком сумматора. Преобразователь выполняет функции усилителя давления с большим коэффициентом передачи $k \gg 1$. Усилитель мощности шарикового типа размещен в камерах А, Б и он является повторителем давления в камере В.

Выходной сигнал усилителя поступает в выключающее реле, расположенное в камерах Н, О, П. При отсутствии давления P_k сопло между камерами П и О открыто, сигнал $P_{вых}$ проходит через камеру Н и далее на мембранный исполнительный механизм. При подаче командного сигнала $P_k = 1$ заслонка перекрывает сопло, и $P_{вых}$ не проходит в исполнительный механизм. Сигнал P_k подается вручную путем перевода переключателя на байпасной панели из положения «автоматическое управление» в положение «ручное управление». Выключающее реле не влияет на динамические свойства регулятора и в дальнейшем не рассматривается.

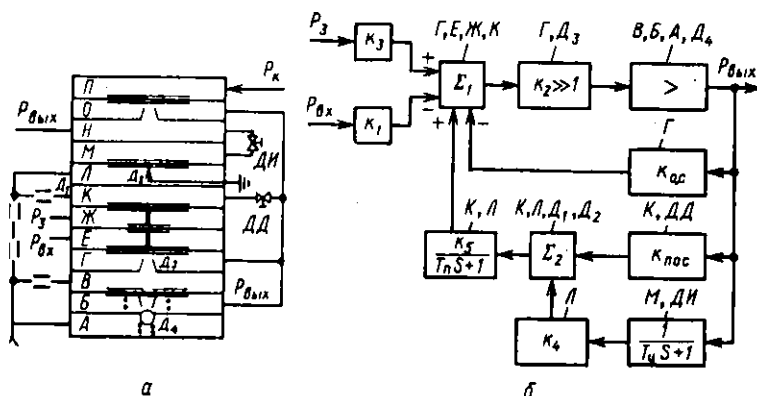


Рис. 1.33. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы регулятора 4РБ-32.

Сигнал $P_{\text{вых}}$ поступает в камеру Г отрицательной обратной связи и в проточную камеру К положительной обратной связи, соединяющуюся постоянным D_1 и переменным D_2 дросселями с атмосферой. Эффективные площади верхней и нижней мембран сумматора равны, однако за счет стока части воздуха через D_1 и D_2 в атмосферу давление в камере К всегда ниже давления в полости Г и усилие отрицательной обратной связи в любой момент времени превышает силу положительной обратной связи.

На входе в камеру положительной обратной связи установлен регулируемый дроссель ДД, позволяющий изменять коэффициент усиления регулятора. При полностью открытом дросселе давления в камерах К и Г почти одинаковы, т. е. влияние обратной связи очень слабое, и регулятор работает как двухпозиционный. Предел пропорциональности в этом случае равен 10%, а коэффициент усиления регулятора максимален и равен 10. При закрытом ДД положительная связь не действует, и влияние отрицательной обратной связи наибольшее — предел пропорциональности равен 250%, а коэффициент усиления — 0,4.

В регуляторе имеется запаздывающая положительная обратная связь (изодромная), создаваемая камерами Н, М, Л, пневмосопротивлением D_2 и регулируемым дросселем ДИ. Сигнал $P_{\text{вых}}$ через ДИ поступает в глухую камеру М, в ней изменяется давление и расстояние заслонки от сопла D_2 , и следовательно, давление в камере К начинает возрастать или уменьшаться. Степень воздействия запаздывающей связи зависит от степени открытия дросселя ДИ. При полном закрытии ДИ получаем П-регулятор, при полном открытии дросселя коэффициент усиления блока максимальный, причем значение его почти не зависит от степени закрытия дросселя ДД.

Регулятор работает следующим образом. При появлении рассогласования e , например $e = P_{\text{вх}} - P_{\text{з}} > 0$, шток сумматора перемещается вниз, давление в полости В возрастает (затрудняется сток воздуха в камеру Г), и $P_{\text{вых}}$ увеличивается. Одновременно с этим возрастают давления в камерах Г и К отрицательной и положительной обратных связей. Так как первая связь действует сильнее, происходит стабилизация (уравновешивание) мембранного сумматора в новом положении относительно сопла в камере Г.

Возросшее давление $P_{\text{вых}}$ поступает на мембранный исполнительный механизм, который передвинет регулирующий орган в новое положение. Регулируемая величина $P_{\text{вх}}$ начнет уменьшаться, однако из-за инерционности объекта изменение ее проявляется не сразу, и $\epsilon(t)$ остается положительной.

При повышении $P_{\text{вых}}$ начинается постепенный переток воздуха из полости Н через дроссель ДИ в камеру М. Давление в ней возрастает, что приводит к увеличению давления в камере положительной обратной связи К и нарушению равновесия мембранного сумматора — смещению его вниз, что вновь приведет к новому увеличению $P_{\text{вых}}$ и уменьшению $P_{\text{вх}}$, и т. д. Процесс изменения $P_{\text{вых}}$ и действия изодромного механизма, имитирующего увеличение $P_{\text{вх}}$, продолжается до тех пор, пока не начнет выполняться тождество $\epsilon(t) \equiv 0$. Теоретически это условие выполняется только при $t = \infty$, но практически переходный процесс в АСР и, следовательно, в регуляторе заканчивается за конечное время (за счет наличия зон нечувствительности у датчиков, сумматора и других элементов регулятора).

Структурная схема регулятора 4БР-32 изображена на рис. 1.33, б. Она составлена с учетом ряда допущений: дроссели и мембраны работают в линейном режиме, постоянные времени усилителей давления и мощности пренебрежимо малы, камера Л является повторителем давления в полости М. Каждое звено схемы образовано одной или несколькими камерами и дросселями регулятора, индексы и обозначения которых показаны на рис. 1.33, б. Узел, состоящий из Σ_2 , $k_{\text{пс}}$, k_4 представляет собой дроссельный сумматор в камере К.

Коэффициенты усиления отдельных звеньев таковы: $k_1 = k_3 = F - f$; $k_2 \gg 1$; $k_{\text{п}}$ примерно равен единице; $k_{\text{ос}} = F$, $k_{\text{пос}} = (1 - \delta k_0)$; $k_4 = \delta k_0$; $k_5 = F$. Здесь F , f — эффективные площади мембран ($F = 2,5f$), $k_0 = 0,4$ — минимальный коэффициент усиления блока (при полном закрытии дросселя ДД и пределе пропорциональности, равном 250%).

Общая передаточная функция регулятора имеет вид:

$$W(s) = (T_{\text{н}}s + 1) W_{\text{п}}(s) / \delta T_{\text{н}}s \quad (1.14)$$

где выражение $W_{\text{п}}(s) = k_0(T_{\text{н}}s + 1)\delta / (k_0\delta + T_{\text{п}}/T_{\text{н}} + T_{\text{п}}s)$ характеризует динамику проточных камер Л и К положительной обратной связи, обладающих достаточно большим объемом. Если бы объем камеры К был мал,

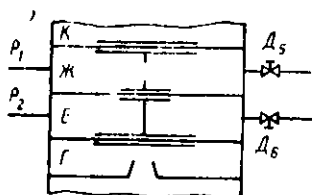


Рис. 1.34. Узел формирования заданного соотношения входных сигналов в регуляторе РБС.

допустимо было бы считать $T_n \approx 0$. Тогда рассматриваемый блок 4РБ-32 реализовывал в «малом» ПИ-закон регулирования, так как $W_n(s)$ в этом случае равна единице. На самом же деле $T_n \neq 0$ и зависит от степени открытия ДД. Приблизительно можно считать $T_n = \delta C$ ($C = 0,01$; δ — в процентах). Как показывают расчеты, влияние динамики паразитных емкостей сильно сказывается на динамических характеристиках всего регулятора при частотах $\omega > 0,15$ рад/с (особенно при больших δ). Поэтому при времени издрома $T_n > 25$ с блок 4РБ-32 можно рассматривать как ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W(s) = (T_n s + 1) / \delta T_n s \quad (1.14a)$$

в области частот $0 \leq \omega \leq \omega_n = 0,15$ рад/с. Если время издрома $T_n \approx 10-25$ с, то ОНР данного блока не превышает 0,1 рад/с. При частотах $0,15 < \omega < 4$ рад/с динамика блока 4РБ-32 описывается передаточной функцией (1.14), что следует учитывать при выборе оптимальных настроек регулятора.

Диапазон изменения параметров настройки регулятора следующий: $10 \leq T_n \leq 6000$ с; $10 \leq \delta \leq 250\%$.

Регуляторы соотношения РБС-I и РБС-II предназначены для автоматического поддержания соотношения двух координат объекта. При этом управляющее воздействие оказывается на одну из этих координат. Регуляторы обычно используют для поддержания заданного соотношения расходов двух веществ. Регулятор РБС-I предназначен для стабилизации заданного соотношения переменных P_1 и P_2 ; блок РБС-II осуществляет поддержание соотношения координат P_1 и P_2 в зависимости от изменений третьего параметра. Оба регулятора реализуют ПИ-закон в ОНР до 0,15 рад/с (при $T_n > 25$ с).

Регуляторы РБС построены на базе блока 4РБ-32. Для получения заданного соотношения входных сигналов P_1 и P_2 в блоке 4РБ-32 камеры Е и Ж делаются

проточными и снабжаются регулируемыми дросселями D_5 и D_6 (рис. 1.34). В момент равновесия мембранного сумматора $P_1 k_5 - P_2 k_6 = 0$, и регулятор поддерживает соотношение сигналов $k = P_1/P_2 = k_6/k_5$ (где k_5, k_6 — коэффициенты усиления проточных камер Е и Ж, зависящие от степени открытия дросселей D_5 и D_6). Диапазон изменения k — от 0,2 до 5 в РБС-I и от 0,1 до 0,8 — в РБС-II. В блоке РБС-I оба дросселя регулируемые (вручную); в РБС-II один дроссель переменный, построен на базе преобразователя давления в перемещение типа сопло—заслонка с обратной связью. Заслонка закреплена на мембране, на которую действует давление воздуха, пропорциональное значению третьего параметра.

В остальном регуляторы РБС аналогичны блоку 4РБ-32.

Блок *предварения* БП-28 реализует закон $P_{\text{вых}}(t) = P_{\text{вх}}(t) + T_n dP_{\text{вх}}(t)/dt$, где T_n — параметр настройки (время предварения). ОНР блока: $0 \leq \omega \leq 1,3/T_n$. Значение T_n изменяется от 3 до 600 с. Самостоятельного значения блок не имеет, применяется совместно с регулятором 4РБ-32 для получения ПИД-закона регулирования. В настоящее время блок используют очень редко.

Функциональные и вспомогательные блоки АУС

Сумматор БС-34 осуществляет алгебраическое сложение трех пневматических сигналов: $P_{\text{вых}} = P_1 + P_2 - P_3$. Построен на трехмембранном усилителе давления. Представляет собой усилительное звено при $\omega \leq \omega_n = 2$ рад/с. Класс точности сумматора — 1.

Функциональные блоки БФ-1, БФ-2 выполняют операции умножения двух сигналов, возведения в квадрат и в степень $1/2$, а также деления одного сигнала на другой. Построены на сильфонных элементах, конструктивно сложны, что предопределило их невысокую эксплуатационную надежность и ограниченное применение.

Ручной и программные задатчики предназначены для выработки постоянного или изменяющегося во времени давления воздуха. В динамическом отношении являются П-регуляторами.

1.5. ЭЛЕМЕНТЫ УСЭППА И ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ СИСТЕМЫ «СТАРТ»

Элементы УСЭППА

Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА) предназначена для построения различных устройств, регуляторов и приборов на базе элементного принципа. В состав УСЭППА входят две группы элементов — аналоговые и дискретные. К первой группе относятся дроссели, емкости, усилители давления (их иногда называют элементами сравнения), повторители давления, усилители мощности и ряд вспомогательных элементов. В группу дискретных элементов входят реле, пневмоклапаны, преобразователи дискретных сигналов и т. п. Из указанных элементов собирают более сложные устройства, например ячейки, модули, блоки, приборы (см. раздел 4.1).

Рассмотрим кратко основные аналоговые и дискретные элементы УСЭППА.

Пневматические емкости. В УСЭППА используют в основном две модификации емкостей — объемом 40 и 50 см³.

Дроссели. Все постоянные дроссели построены на капиллярах длиной 20 мм, диаметром 0,18 или 0,32 мм. Перед поступлением в капилляр воздух проходит через фильтр из шерстяной пряжи. Дроссели не взаимозаменяемы и нуждаются в индивидуальной калибровке. Регулируемые вручную дроссели строятся по схеме конус—конус и конус—цилиндр и разделяются на шкальные и бесшкальные. Максимальный угол поворота настроечного винта, перемещающего конус, достигает 300°, проводимость дросселей изменяется при этом более чем в 1000 раз. Режим течения воздуха — ламинарный (кроме случая почти полного открытия дросселя).

Усилители давления. Изготавливают двух- и четырех-входные усилители, собираемые соответственно на трех- и пятимембранных элементах (см. рис. 1.18). Каждый усилитель имеет два последовательно включенных дросселя типа сопло—заслонка. Оба сопла могут перемещаться с помощью винтов, что используют при индивидуальной настройке элементов. Зоны линейности усилителей не превышают 200 и 400 Па, а коэффициенты усиления достигают 700 и 350 соответственно. Усилители давления иногда называют элементами сравнения, так

как их можно использовать и для определения знака алгебраической суммы для двух ($P_1 - P_2$) или четырех ($P_1 - P_2 + P_3 - P_4$) пневматических сигналов.

Повторители давления. Выпускают две модификации точных повторителей — без сдвига и со сдвигом. Класс точности первого повторителя 0,25, второго — 0,5; область нормальной работы — не выше 2,5 рад/с при нагрузке на выходе около 50 см³ (при малых объемах нагрузки ОНР возрастает до 20 рад/с). Повторители со сдвигом могут смещать $P_{\text{вых}}$ на $\pm 0,15 \cdot 10^5$ Па относительно $P_{\text{вх}}$. Оба элемента построены на одномембранном усилителе с переменным дросселем сопло—заслонка (см. рис. 1.19, а, в). Расход воздуха на выходе повторителей невелик (около 0,4 л/мин), поэтому их применяют для разъединения различных элементов внутри приборов. В состав УСЭППА входит грубый повторитель — усилитель мощности шарикового типа с большим расходом воздуха (до 2 л/мин). Его устанавливают в конечных каскадах приборов и используют для передачи сигналов в длинных пневмолиниях (до 300 м). Класс точности его 5, верхняя граница ОНР составляет 20 рад/с при нагрузке в виде пневмолинии длиной 60 м.

Сумматоры. Дроссельные сумматоры двух модификаций реализуют операцию $P_{\text{вых}} = k_1 P_1 + k_2 P_2$, где множители k_1, k_2 удовлетворяют условиям $k_1 + k_2 = 1$; $0,01 \leq k_1 \leq 0,99$; $0,01 \leq k_2 \leq 0,99$. Каждый сумматор имеет постоянный дроссель типа капилляр и регулируемое вручную пневмосоппротивление конус—седло, изменением проводимости которого подбирают нужные значения k_1 и k_2 . Класс точности сумматоров — 1 при изменении сигналов P_1 и P_2 не более чем на $0,1 \cdot 10^5$ Па или одного из них на $0,35 \cdot 10^5$ Па. Постоянная времени проточной камеры сумматора зависит от k_1 и k_2 , в среднем она равна 0,3—0,4 с, верхняя граница ОНР определяется соотношением $\omega_n = 0,3/k_1$.

Устройство непрерывной памяти построено на трехмембранном усилителе давления и повторителе. Принципиальная схема его приведена на рис. 1.29. Класс точности равен 0,4 при частотах меньше $\omega_n = 1,5$ рад/с.

Трехмембранное реле предназначено для построения логических дискретных устройств и реализуется на трехмембранном элементе, охваченном положительной обратной связью (см. рис. 1.26). Хотя схемы реле и усилителя одинаковы, но конструктивно они различаются суще-

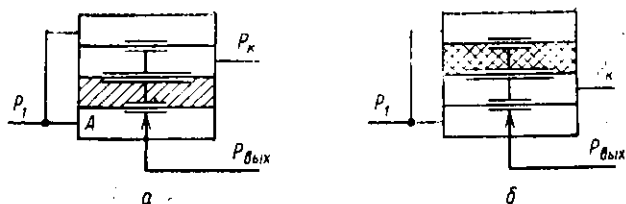


Рис. 1.35. Принципиальные схемы нормально замкнутого (а) и нормально разомкнутого (б) пневмоклапанов.

ственно. В частности, в реле сопла неподвижны и имеют большие отверстия, мембраны более толстые и грубые, а заслонка неметаллическая. Реле не нуждается в индивидуальной настройке. Все модификации реле обладают зоной гистерезиса $(0,4—0,56) \cdot 10^5$ Па, зоной линейности $(0,04—0,05) \cdot 10^5$ Па, временем срабатывания 0,1 с, верхней границей ОНР — 10—15 Гц.

Клапаны предназначены для размыкания (замыкания) пневмолиний и строятся на базе мембранных элементов. На рис. 1.35, а приведена принципиальная схема нормально замкнутого клапана, у которого при командном давлении $P_k=0$ пневмолиния P_1 — камера А— $P_{вых}$ не прервана. Схема нормально разомкнутого клапана показана на рис. 1.35, б. Имется ряд модификаций таких клапанов, выполненных на базе двух-, трех- и четырехмембранных элементов. Для замыкания (размыкания) пневмолиний большого диаметра применяют одно- и двухмембранные клапаны, которые обычно устанавливают на выходе пневматических приборов. Наконец, в УСЭППА имеются обратные клапаны, пропускающие воздух только в одном направлении, и клапаны для коммутации двух входных сигналов по определенным командам.

Общее число типов и модификаций серийно выпускаемых элементов УСЭППА достигает нескольких десятков. Как правило, они имеют небольшие габаритные размеры (в среднем $40 \times 40 \times 50$ мм). Однако при построении сложных пневматических приборов и систем, в которые входит несколько тысяч таких элементов, размеры устройств становятся чрезмерно большими. С целью уменьшения размеров основных элементов УСЭППА, улучшения их метрологических характеристик и сокращения номенклатуры разработан комплекс ми-

ниатюрных элементов и модулей пневмоавтоматики (КЭМП). Габаритные размеры элементов КЭМП уменьшены примерно в 1,5—2 раза, а занимаемый ими объем — в 4—8 раз. Все элементы КЭМП обладают высокой надежностью — вероятность их безотказной работы в течение 2000 часов равна 0,98 (при доверительной вероятности 0,8), а срок службы не менее 8 лет. Выпускаемые элементы и модули КЭМП предназначаются для замены соответствующих элементов УСЭППА.

Пневмоскопность ЕАМП. Объем этого элемента равен 25 ± 4 см³, диаметр 40 мм, высота 30 мм.

Пневмосопротивления постоянные (нерегулируемые) САМП-4. Выпускают шесть модификаций этого ламинарного дросселя, различающиеся диаметром капилляра ($d=0,18; 0,3; 0,4; 0,5$ мм), его длиной ($L=7; 20; 40$ мм) и максимальным расходом при перепаде $1,4 \cdot 10^5$ Па ($G=19; 22; 25; 60; 136; 225$ л/ч).

Пневмосопротивления регулируемые САМП-1, 2, 3. Первые две модификации имеют шкалы, третья бесшкальная. Эти дроссели построены на базе сопротивления конус — конус, обеспечивают минимальный расход воздуха 0,04 л/ч, максимальный — 250 л/ч. Проводимость дросселя изменяется поворотом винта.

Компаратор КАМП. Компаратор, или элемент сравнения, предназначен для сравнения двух аналоговых сигналов P_1 и P_2 и усиления их разности ΔP . Идеализированная статическая характеристика компаратора такая же, как и сигнум-реле: $P_{\text{вых}} = P_n$ при $\Delta P > 0$ и $P_{\text{вых}} = 0$ при $\Delta P < 0$. Фактически компаратор имеет узкую зону линейности и используется как усилитель давления с коэффициентом передачи $k \gg 1$. Он состоит из пяти камер, двух «вiable» мембран 1 и 2, переменного дросселя D_1 , пневмоклапана D_2 и постоянного пневмосопротивления (рис. 1.36). При $P_1 - P_2 > 0$ давление в камере В понижается, заслонка 3 прикрывает клапан D_2 , уменьшает сброс воздуха в атмосферу, и $P_{\text{вых}}$ становится равным P_n . При $\Delta P < 0$ давление в камере В возрастает, мембрана 2 прикрывает заслонкой 3 подвод питания, и выходной канал соединяется с атмосферой, т. е. $P_{\text{вых}} = 0$. Погрешность компаратора составляет ± 200 Па.

Повторители давления ПАМП-1, 2, 3. Первая модификация предназначена для повторения выходным сигналом входного, вторая — для повторения со сдвигом (т. е. $P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \pm \Delta P$), третья — для усиления мощности (расхода). Класс точности ПАМП-1 равен 0,25, остальных модификаций — 0,5. Максимальный расход воздуха ПАМП-3 составляет 1500 л/ч.

Принципиальная схема двухсоплового повторителя ПАМП-1 приведена на рис. 1.37, а. Он состоит из четырех камер, двух мембран, двух последовательно включенных дросселей сопло — за-

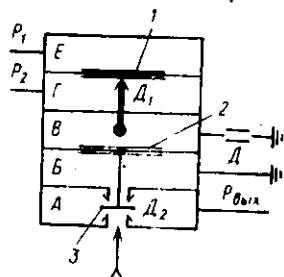


Рис. 1.36. Принципиальная схема компаратора КАМП:

1, 2 — мембраны; 3 — заслонка.

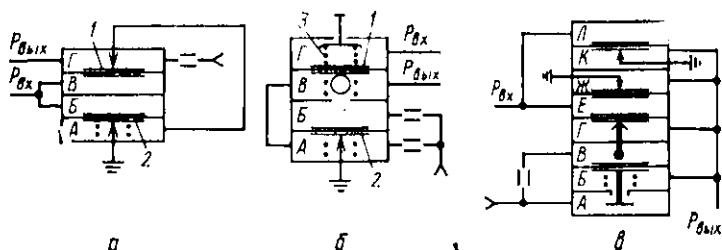


Рис. 1.37. Принципиальные схемы повторителей:

а — ПАМП-1; б — ПАМП-2; в — усилителя мощности ПАМП-3; 1, 2 — мембраны; 3 — регулировочная пружина.

слонка, одного постоянного пневмосопротивления и установочной пружины. При возрастании $P_{вх}$ мембраны 1 и 2 прикрывают сопла, сток воздуха из камеры Г в атмосферу уменьшается, и $P_{вых}$ возрастает до тех пор, пока не сравняется с $P_{вх}$.

Повторитель со сдвигом состоит из четырех камер (три из них — проточные), двух мембран, двух переменных дросселей сопло — заслонка и шарик — седло, двух постоянных пневмосопротивлений и трех пружин, одна из которых является задатчиком сдвига ΔP (рис. 1.37, б). Принцип работы повторителя следующий: при возрастании $P_{вх}$ мембрана 1 перемещает шарик вниз и прикрывает сопло, давление в камере Б возрастает, мембрана 2 перемещается и прикрывает сопло Д, соединяющее полость А с атмосферой. Давление в камерах А и Б и $P_{вых}$ возрастают до тех пор, пока не выполнится условие равновесия $P_{вх}F + \Phi = P_{вых}F$, где Φ — усилие, создаваемое регулировочной пружиной 3.

Усилитель мощности ПАМП-3 содержит 7 камер, три мембраны, три переменных дросселя, пневмоклапан и постоянное сопротивление на линии питания (рис. 1.37, в). При возрастании $P_{вх}$ мембраны 1 и 2 прикрывают сопла, сброс воздуха в атмосферу из камер Ж и Г уменьшается, и $P_{вых}$ возрастает. Камеры Ж и Г связаны с полостями Г и В, поэтому в них также будет возрастать давление воздуха, что вызовет перемещение вниз диска 4 и увеличение расхода воздуха через клапан в выходную линию. Этот процесс возрастания $P_{вых}$ будет продолжаться до выполнения равенства $P_{вых} = P_{вх}$.

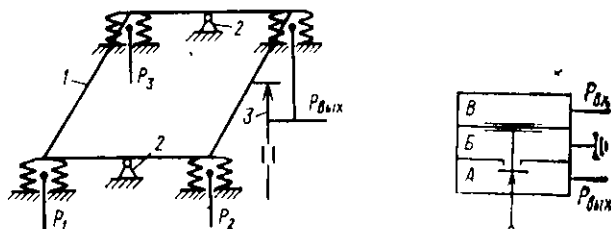


Рис. 1.38. Принципиальная схема сумматора давлений СМАМП:

1 — рама; 2 — шарниры; 3 — дроссель типа сопло-заслонка.

Рис. 1.39. Принципиальная схема реле интегрального модуля ПИМИ.

Сумматор СМАМП предназначен для алгебраического суммирования трех давлений. Он состоит из четырех сильфонов, рамы 1, двух шарниров 2 и переменного дросселя сопло — заслонка 3 (рис. 1.38). При изменении какого-либо из сигналов P_1, P_2, P_3 меняется усилие, развиваемое соответствующим сильфоном, и рама начинает поворачиваться относительно своих осей вращения. При этом изменяются положение заслонки относительно неподвижного сопла и давление $P_{\text{вых}}$ в сильфоне отрицательной обратной связи. Сумматор выполняет операцию $P_{\text{вых}} = P_1 - P_2 + P_3$ с максимальной погрешностью 0,5%.

В состав КЭМП входят также *модуль интегральный ПИМИ*, содержащий четыре реле для реализации логических функций отрицания (рис. 1.39), *клапан двухконтактный КЛАМП* для коммутации двух непрерывных пневматических сигналов и реализации логической функции конъюнкции, а также пневмозадатчик ЗАМП-1 для установки и стабилизации сигналов малой мощности.

Пневматические регуляторы, функциональные устройства и приборы системы «Старт» построены на элементах УСЭППА. Принцип действия регуляторов и приборов — компенсация усилий при очень малых перемещениях чувствительных элементов — мембран и сильфонов.

Пропорционально-интегральный регулятор типа ПР3.21

Регулятор (рис. 1.40) состоит из трех пятимембранных усилителей давления 1—3, дроссельного сумматора 4, усилителя мощности 5, отключающего реле 6, глухой камеры 7 и регулируемого дросселя ДИ. Усилители давления охвачены отрицательной обратной связью и выполняют функции сумматоров, элемент 3 обладает большим коэффициентом усиления ($k \gg 1$).

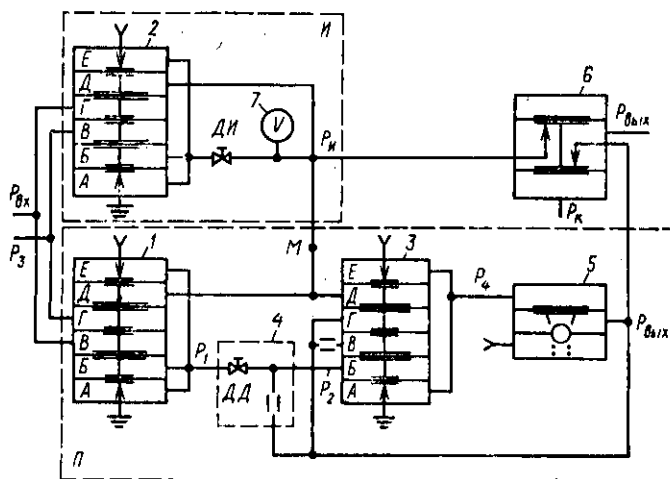
Регулятор состоит из двух узлов, формирующих пропорциональную и интегральную составляющие ПИ-закона:

$$P_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{\delta} [P_{\text{вх}}(t) - P_3] + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t [P_{\text{вх}}(\tau) - P_3] d\tau$$

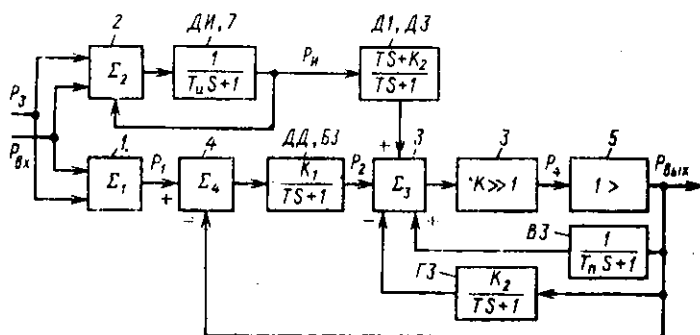
где δ и $T_{\text{и}}$ — параметры настройки; δ — предел пропорциональности, или диапазон дросселирования; $T_{\text{и}}$ — постоянная интегрирования.

Пропорциональная составляющая вырабатывается элементами 1, 3—5. Рассмотрим вначале работу этой части регулятора.

Сигналы от первичного преобразователя $P_{\text{вх}}$ и от датчика P_3 подаются в камеры Г и В сумматора 1; в полость Д этого же элемента вводится давление $P_{\text{и}}$ от



а



б

Рис. 1.40. Регулятор ПР3.21:

а — принципиальная схема; б — структурная схема; 1, 2 — мембранные сумматоры; 3 — усилитель давления; 4 — дроссельный сумматор; 5 — усилитель мощности; 6 — выключающее реле; 7 — глухая камера.

интегральной части регулятора (временно будем считать его постоянным, выполняющим роль опорного сигнала для формирования выходного давления $P_{\text{вых}}$ при равенстве $P_{\text{вх}}$ и P_3). На выходе сумматора 1 давление $P_1 = P_3 - P_{\text{вх}} + P_{\text{и}}$. Оно затем складывается с давлением $P_{\text{вых}}$ на дроссельном сумматоре 4. В камеру Б усилителя 3 вводится сигнал $P_2 = k_1 P_1 + k_2 P_{\text{вых}}$, где множители k_1 и k_2 определяют степень открытия регулируемого дросселя ДД (заметим, что $k_1 + k_2 = 1$).

В камеру Д усилителя 3 подается то же «опорное» давление $P_{и}$, что и в аналогичную полость сумматора 1.

Эффективные площади мембран камер Д и Б равны, и если бы в сумматоре 4 было бы $k_1=1$, то сигнал $P_{и}$ не влиял бы на работу усилителя давления. В этом усилителе имеются демпфирующие — отрицательная и положительная — обратные связи, образуемые камерами Г и В, в которые вводится $P_{вых}$. Связи предназначены для устранения автоколебаний, возникающих в замкнутом контуре «сумматор 4 — усилитель 3 с почти релейной статической характеристикой — грубый повторитель — линия отрицательной обратной связи — сумматор 4». В статике давления в камерах Г и В равны, поэтому обратные связи не работают; в динамике преобладающее влияние имеет отрицательная связь, так как давление в камере Г всегда выше, чем в камере В. Вследствие этого усилитель 3 может находиться в статическом равновесии только при условии $P_2=P_{и}$. Возникающее при этом на выходе усилителя давление P_4 поступает затем в грубый повторитель для усиления расхода воздуха, затем сигнал $P_{вых}=P_4$ вводится в сумматор 4 и одновременно подается через выключающее реле 6 в мембранный исполнительный механизм.

Статическую характеристику пропорциональной части регулятора можно получить из уравнения $P_2 = k_1 P_1 + k_2 P_{вых}$ сумматора 4, подставив в него $P_2=P_{и}$ и P_1 . Имеем: $P_{и} = k_1 (P_3 - P_{вх} + P_{и}) + k_2 P_{вых}$. Учитывая соотношение $k_1 = 1 - k_2$, получаем:

$$P_{вых} = (P_{вх} - P_3) k_1 / k_2 + P_{и} = (P_{вх} - P_3) / \delta + P_{и} \text{ где } \delta = k_2 / k_1$$

П-регулятор работает следующим образом. Предположим, что $P_{вх} > P_3$. Тогда давление P_1 на выходе сумматора 1 возрастет, что вызовет увеличение сигнала P_2 в камере Б усилителя 3. Мембранный шток этого элемента начнет перемещаться вверх, давления P_4 и $P_{вых}$ уменьшатся. Расход воздуха через постоянный дроссель в сумматоре 4 также уменьшится, что приведет к убыванию слагаемого $k_2 P_{вых}$ в сумматоре 4 до тех пор, пока $P_2 = k_1 P_1 + k_2 P_2$ вновь не сравняется с $P_{и}$.

Интегральная составляющая $P_{и}$ выходного сигнала $P_{вых}$ образуется в интеграторе, состоящем из сумматора 2, пневмоемкости 7 и регулируемого дросселя ДИ. Сумматор и глухая камера охвачены положительной обратной связью — давление $P_{и}$ вводится в камеру Д сумматора. Нетрудно убедиться (см. раздел 1.2, рис. 1.21), что

P_n изменяется во времени по закону $P_n(t) = \int_0^t (P_{вх}(\tau) - P_3) d\tau / T_n$, где параметр T_n определяется степенью открытия дросселя ДИ.

Таким образом при упрощенном анализе (без учета динамических свойств ряда элементов пропорциональной части регулятора) получим закон регулирования:

$$P_{вых}(t) = \frac{1}{\delta} [P_{вх}(t) - P_3] + \frac{1}{T_n} \int_0^t [P_{вх}(\tau) - P_3] d\tau$$

Структурная схема регулятора (рис. 1.40, б) учитывает динамические свойства большинства элементов, образующих интегральную и пропорциональную составляющие выходного сигнала (номера этих элементов и обозначения соответствующих камер проставлены над передаточными функциями).

Интегральная часть содержит сумматор Σ_2 и аperiodическое звено с передаточной функцией $(T_n s + 1)^{-1}$. В целом по каналу $\Delta P(s) = P_{вх}(s) - P_3(s) \rightarrow P_n(s)$ передаточная функция $W(s) = 1/T_n s$.

В структурной схеме пропорциональной части учтено следующее: совместное влияние глухой камеры Д элементов 1, 3 и дросселя ДД — передаточная функция $(Ts + k_2)/(Ts + 1)$; динамика дроссельного сумматора 4 и камеры Б усилителя 3 — передаточная функция $k_1/(Ts + 1)$; действие отрицательной и положительной обратных связей в переходных процессах — передаточные функции $k_2/(Ts + 1)$ и $(T_n s + 1)^{-1}$. Здесь T — постоянная времени дроссельного сумматора и глухой камеры, зависящая от коэффициента k_2 и примерно равная 0,3 с; T_n — постоянная времени камеры В и дросселя положительной обратной связи усилителя 3 ($T_n \sim 0,1$ с). Усилитель 3 рассматривается как статический элемент с $k \gg 1$; передаточная функция грубого повторителя примерно равна единице.

После ряда упрощений структурной схемы можно получить общую передаточную функцию регулятора

$$W(s) = (1/\delta + T/T_n + 1/T_n s) W_n(s),$$

где функция $W_n(s)$ зависит от постоянных времени T и T_n и $\delta = k_2/k_1$. Функция W_n искажает динамические характеристики регулятора ПРЗ.21, что особенно проявляется при больших частотах ω и малых δ . Как показыва-

ют расчеты, в области частот $0 \leq \omega \leq \omega_n = 1,54\delta / (1 + \delta)$ влияние $W_n(s)$ на динамические свойства ПРЗ.21 незначительно, и его можно рассматривать как ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W(s) = 1/\delta + 1/T_n s \quad (\text{при } \delta \gg 10\% \text{ и } T/T_n = 0,3/T_n \approx 0).$$

Регулятор ПРЗ.21 снабжен отключающим реле, которое при поступлении командного сигнала $P_k = 1$ отсекает прибор от исполнительного механизма. При этом пневмоёмкость 7 и камеры Д элементов 1—3 остаются соединёнными с выходной линией, что облегчает плавный переход с ручного или дистанционного управления на автоматическое.

Параметры настройки регулятора ПРЗ.21 практически не зависят друг от друга: при изменении предела пропорциональности значение T_n не изменяется; вариации T_n слабо влияют на коэффициент усиления $1/\delta$ П-регулятора. Время T_n может изменяться от 3 до 6000 с, предел пропорциональности δ — от 5 до 3000%.

Пропорциональный регулятор ПР2.5

Этот регулятор устроен аналогично той части регулятора ПРЗ.21, в которой вырабатывается пропорциональная составляющая выходного сигнала. К точке М (см. рис. 1.40, а) регулятора вместо P_n подводится постоянное давление P_o , создаваемое ручным задатчиком непосредственно в приборе. Сигнал P_o необходим для формирования выходного давления $P_{\text{вых}} > 0$ при $P_{\text{вх}} = P_3$. Предел пропорциональности регулятора изменяется от 5 до 3000%; ОНР такая же, как и в приборе ПРЗ.21.

Регуляторы соотношения ПРЗ.23 и ПРЗ.24

Устройства представляют собой последовательное соединение блока соотношения и регулятора типа ПРЗ.21. Блок соотношения устроен на базе двух дроссельных сумматоров, каждый из которых состоит из постоянного и регулируемого дросселей (рис. 1.41). Предполагая линейность дросселей, можно найти выходной сигнал блока соотношения

$$\Delta P = P'_1 - P'_2 = k_1 (P_1 - P_o) - k_2 (P_2 - P_o)$$

где P_o — постоянное опорное давление, обычно равное $0,2 \cdot 10^5$ Па; P_1, P_2 — давления от первичных преобразо-

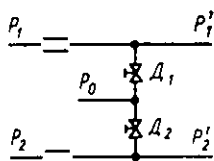


Рис. 1.41. Принципиальная схема блока соотношения регулятора ПРЗ.23.

вателей (датчиков); k_1, k_2 — коэффициенты усиления сумматоров, зависящие от проводимостей дросселей. Сигнал ΔP поступает на вход ПИ-регулятора, который при P_3 обеспечивает поддержание $\Delta P = 0$. Тем самым регулятор стабилизирует заданное соотношение сигналов P_1 и P_2 :

$$k = k_2/k_1 = (P_1 - P_0)/(P_2 - P_0)$$

Значение k можно изменять от 0,1 до 10 регулируемые дросселями D_1 и D_2 . В регуляторе ПРЗ.23 оба дросселя регулируемые; в ПРЗ.24 один дроссель переменный, коэффициент k в этом регуляторе можно варьировать от 0,05 до 1. Область настройки регуляторов соотношения несколько уже, чем прибора ПРЗ.21. Частота ω_n определяется из соотношения $\omega_n = 1,54\delta/(1 + \delta + 7,5k_1\delta)$ и зависит не только от коэффициента усиления регулятора $1/\delta$, но и от значения k_1 блока соотношения.

Устройство предварения ПФ2.1

Устройство предназначено для формирования пропорционально-дифференциального закона

$$P_{\text{вых}}(t) = P_{\text{вх}}(t) + T_{\text{п}} dP_{\text{вх}}(t)/dt.$$

Самостоятельного значения устройство не имеет, но довольно часто его используют совместно с П- и ПИ-регуляторами для построения ПД- и ПИД-законов регулирования.

Принципиальная схема блока ПФ2.1 приведена на рис. 1.42, а. Он состоит из двух трехмембранных усилителей давления 1 и 2, грубого мощного повторителя 3, пневмоемкости 4 и регулируемого дросселя ДП. Нужный закон изменения $P_{\text{вых}}$ формируется в усилителе 1, охваченном отрицательной обратной связью, в цепь которой включено апериодическое звено (дроссель ДП и пневмоемкость 4). Усилитель давления 2 и грубый повторитель 3 охвачены единичной отрицательной обратной связью и в совокупности представляют собой точный мощный

повторитель давления с передаточной функцией $W(s) = 1$.

Найдем передаточную функцию блока предварения, структурная схема которого изображена на рис. 1.42, б (в ней не учтен точный мощный повторитель). На этой схеме звено Σ характеризует сумматор усилий в элементе 1, звено с передаточной функцией $W(s) = k \gg 1$ описывает усилитель давления 1. Остальные усилительные звенья с коэффициентами передачи $F-f$ и f характеризуют преобразование давлений в усилия в тех или иных камерах элемента 1 (обозначения камер проставлены над звеньями структурной схемы). Передаточная функция блока прямого предварения ПФ2.1 такова:

$$W(s) = \frac{P_{\text{вых}}(s)}{P_{\text{вх}}(s)} = \frac{(f + F - f)k}{1 + k[f + (F - f)/(T_n s + 1)]} \approx \frac{T_n s + 1}{q T_n s + 1}$$

где T_n — постоянная времени глухой камеры (значение T_n зависит от степени открытия дросселя ДП); $q = f/F$ (для используемых в блоке мембран с эффективными площадями F и f значение $q \approx 0,133$). Полученная передаточная функция блока ПФ2.1 отличается от теорети-

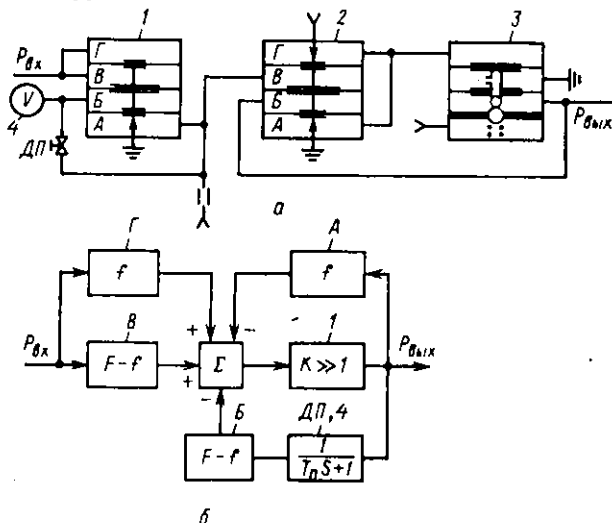


Рис. 1.42. Устройство предварения ПФ2.1:

а — принципиальная схема; б — структурная схема; 1, 2 — усилители давления; 3 — грубый повторитель; 4 — пневмочувствительность.

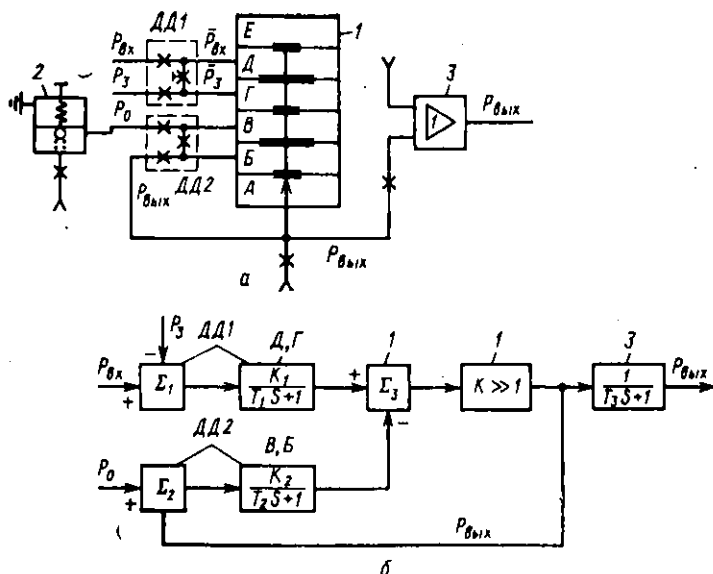


Рис. 1.43. Пропорциональный регулятор ПР2.8:

а — принципиальная схема; б — структурная схема; 1 — мембранный усилитель давления; 2 — датчик; 3 — точный мощный повторитель.

ческих характеристик устройства предварения, что особенно проявляется при больших T_n и ω . Область нормальных режимов блока ограничена частотой $\omega_n = 1,2/T_n$.

Модифицированные регуляторы ПР2.8 и ПР3.31

Один из недостатков рассмотренных выше регуляторов системы «Старт» — нелинейность статических характеристик, проявляющаяся при увеличении диапазона изменения давлений и перепадов давлений на дроссельных и мембранных элементах. Пропорциональный (ПР2.8) и пропорционально-интегральный (ПР3.31) регуляторы имеют более линейные статические характеристики, чем блоки ПФ2.1, ПР2.5 и ПР3.21, и являются их модификациями.

Пропорциональный регулятор ПР2.8. Упрощенная принципиальная схема регулятора приведена на рис. 1.43, а. Регулятор построен по двухкаскадной схеме. Первый каскад состоит из двух делителей давления ДД1 и ДД2, усилителя давления 1 с коэффициентом передачи $k \gg 1$, датчика опорного сигнала 2 и постоянного дрос-

себя в линии питания. Второй каскад представляет собой точный мощный повторитель 3; он построен на базе усилителя давления и грубого повторителя, охваченных единичной отрицательной обратной связью (см. рис. 1.19, г). На принципиальной схеме второй каскад показан в условных обозначениях.

Пропорциональный закон регулирования формируется первым каскадом; существенную роль при этом играют делители ДД1 и ДД2. Каждый делитель состоит из двух постоянных пневмосопротивлений проводимостью a и регулируемого дросселя проводимостью b . Определим перепад давления $\Delta P_1 = \bar{P}_{\text{вх}} - \bar{P}_3$ на выходе делителя ДД1. Используя уравнение линейного дроссельного сумматора (см. раздел 1.2), найдем:

$$\bar{P}_3 = \frac{a_1}{a_1 + b_1} P_3 + \frac{b_1}{a_1 + b_1} \bar{P}_{\text{вх}} \quad \bar{P}_{\text{вх}} = \frac{a_1}{a_1 + b_1} P_{\text{вх}} + \frac{b_1}{a_1 + b_1} \bar{P}_3$$

Вычитая первое равенство из второго и выполняя несложные преобразования, получим

$$\Delta P_1 = \bar{P}_{\text{вх}} - \bar{P}_3 = \frac{a_1}{a_1 + 2b_1} (P_{\text{вх}} - P_3) = k_1 (P_{\text{вх}} - P_3) \quad (1.15)$$

где $k_1 = a_1 / (a_1 + 2b_1)$. Величину k_1 можно изменять в интервале от 0,01 до 0,98 вариацией проводимости b_1 регулируемого дросселя делителя ДД1. Аналогично получаем уравнение статики для делителя давлений ДД2:

$$\Delta P_2 = \bar{P}_{\text{вых}} - \bar{P}_0 = k_2 (P_{\text{вых}} - P_0)$$

$$\text{где } k_2 = a_2 / (a_2 + 2b_2), \quad 0,01 < k_2 < 0,98.$$

Здесь P_0 — опорное давление, необходимое для настройки выходного сигнала регулятора $P_{\text{вых}} > 0$ при равенстве $P_{\text{вх}}$ и P_3 . Давление P_0 создается ручным задатчиком, смонтированным в прибор.

Зависимости для ΔP_1 и ΔP_2 получены для линейных дросселей, однако с погрешностью около 1,5% эти уравнения описывают и статику делителей, построенных на ламинарных нелинейных постоянных и регулируемых дросселях.

Рассмотрим работу первого каскада регулятора. На вход усилителя давления 1 поступают сигналы ΔP_1 и ΔP_2 . Выходное давление $P_{\text{вых}}$ усилителя через делитель

ДД2 вводится в камеру отрицательной обратной связи элемента 1, что позволяет достигать равновесия его мембранного сумматора сил. Это равновесие возможно при балансе усилий

$$\bar{P}_{\text{вх}}(F-f) - \bar{P}_3(F-f) + \bar{P}_0(F-f) - \bar{P}_{\text{вых}}(F-f) = 0$$

$$\text{откуда } k_1(P_{\text{вх}} - P_3) = k_2(P_{\text{вых}} - P_0).$$

Окончательно получим уравнение статики регулятора

$$P_{\text{вых}} = (P_{\text{вх}} - P_3)/\delta + P_0 \quad (1.16)$$

где предел пропорциональности $\delta = k_2/k_1$ можно изменять делителями ДД1 и ДД2. Если нужное значение δ меньше 100%, то регулируемый дроссель делителя ДД1 закрывается, а варьирование осуществляется дросселем ДД2; при $\delta \geq 100\%$ поступают наоборот.

Усилитель 1 обладает почти релейной статической характеристикой, поэтому в замкнутом контуре «делитель ДД2 с глухой камерой Б — усилитель — линия обратной связи — делитель ДД2» возникают автоколебания. Для ослабления их на входе усилителя мощности второго каскада регулятора устанавливают демпфирующий дроссель с передаточной функцией $W(s) = (T_3s + 1)^{-1}$, где T_3 — постоянная времени делителя и входной камеры повторителя ($T_3 \sim 0,18$ с).

Структурная схема регулятора ПР2.8 приведена на рис. 1.43, б. В этой схеме сумматор Σ_1 и звено с функцией $W(s) = k_1/(T_1s + 1)$ описывают динамику делителя ДД1 и глухих камер Д и Г усилителя 1. Аналогично элементы Σ_2 и $k_2/(T_2s + 1)$ учитывают динамические свойства делителя ДД2 и камер Б и В. Звено Σ_3 относится к мембранному сумматору усилий элемента 1. Наконец, передаточная функция $(T_3s + 1)^{-1}$ учитывает динамику демпфирующего дросселя. Общая передаточная функция блока:

$$W(s) = W_n(s)/\delta$$

$$W_n(s) = (T_3s + 1)/(T_1s + 1)(T_2s + 1)$$

Постоянные времени T_1 , T_2 зависят от коэффициентов k_1 и k_2 делителей ДД1 и ДД2. Передаточная функция $W_n(s)$ характеризует степень отличия блока ПР2.8 от теоретического П-регулятора. Область настройки регулятора ПР2.8 ограничена сверху частотой $\omega_n = 0,15$ рад/с.

Пропорционально-интегральный регулятор ПР3.31. Упрощенная принципиальная схема его приведена на рис. 1.44, а. Регулятор имеет три каскада. В первых двух

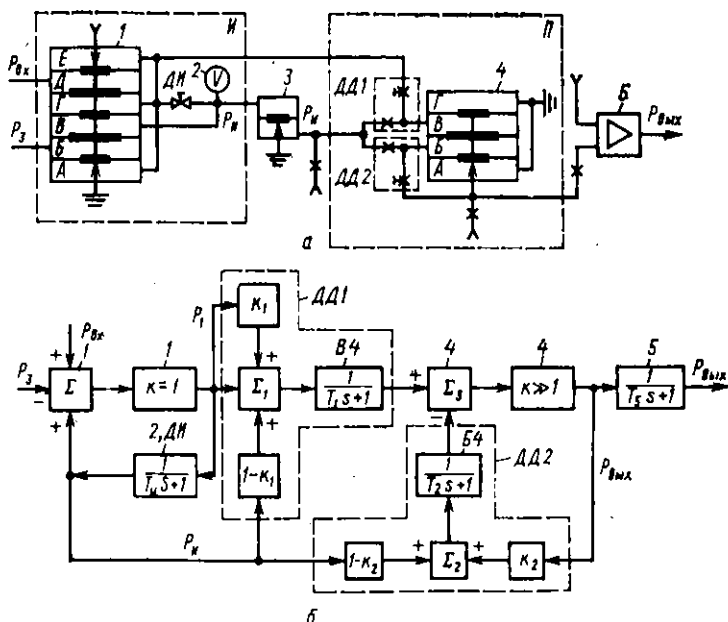


Рис. 1.44. Пропорционально-интегральный регулятор ПР3.31:

а — принципиальная схема; б — структурная схема; 1 — мембранный сумматор; 2 — пневмочемкость; 3 — точный повторитель; 4 — трехмембранный усилитель давления; 5 — усилитель мощности.

формируются интегральная и пропорциональная компоненты выходного сигнала, в третьем производится усиление мощности (на схеме этот каскад показан в условных обозначениях).

Интегральная составляющая получается путем охвата апериодического звена (дрессель ДИ и пневмочемкость) единичной положительной обратной связью, вводимой в камеру В сумматора 1. Выходной сигнал P_n после емкости 2 проходит через точный повторитель 3 и вводится в делители ДД1 и ДД2 пропорциональной части регулятора. К этим же делителям подводится давление $P_{вых}$ с выхода усилителя 4 и сигнал P_1 от сумматора 1.

Пропорциональная часть блока ПР3.31 реализована на трехмембранном элементе 4 и обладает линейной статической характеристикой типа (1.16). Действительно, равновесие мембранного сумматора усилий в элементе 4 возможно при равенстве давлений P_B и $P_В$ в камерах В и Б. Эти давления равны

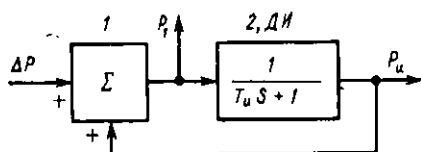


Рис. 1.45. Структурная схема узла сумматор — дроссель — глухая камера.

$$P_B = a_1 P_H / (a_1 + b_1) + b_1 P_1 / (a_1 + b_1);$$

$$P_B = a_2 P_H / (a_2 + b_2) + b_2 P_{\text{вых}} / (a_2 + b_2)$$

где a_1, a_2 — проводимости постоянных дросселей делителей ДД1, ДД2; b_1, b_2 — то же, для регулируемых дросселей. Из равенства $P_B = P_B$ получаем:

$$P_{\text{вых}} = (P_1 - P_H) k_1 / k_2 + P_H = (P_1 - P_H) / \delta + P_H$$

$$\text{где } k_1 = b_1 / (a_1 + b_1), \quad k_2 = b_2 / (a_2 + b_2), \quad \delta = k_2 / k_1.$$

Эта зависимость описывает (с погрешностью около 3%) статику делителей давления с ламинарными дросселями и усилителя 3 в достаточно широком интервале изменения сигналов.

Определим давления P_H , P_1 и $P_1 - P_H$. На рис. 1.45 показана структурная схема узла, состоящего из сумматора 1, дросселя ДИ и пневмочастоты 2. Очевидно, что передаточная функция

$$W(s) = P_H(s) / \Delta P(s) = 1 / T_H s$$

поэтому

$$P_H(s) = \Delta P(s) / T_H s, \text{ где } \Delta P = P_{\text{вых}} - P_3$$

Сигнал P_1 измеряется на выходе сумматора, поэтому апериодическое звено с передаточной функцией $(T_H s + 1)^{-1}$ охватывается положительной обратной связью. Отсюда $W(s) = P_1(s) / \Delta P(s) = 1 + 1 / T_H s$. Сигнал $P_1(s) = \Delta P(s) + \Delta P(s) / T_H s$, а интересующая нас разность $P_1 - P_H = P_{\text{вых}}(s) - P_3(s)$. Переходя к оригиналам, получаем:

$$P_H(t) = \frac{1}{T_H} \int_0^t [P_{\text{вых}}(\tau) - P_3] d\tau \quad P_1(t) - P_H(t) = P_{\text{вых}}(t) - P_3$$

Итак, при упрощенном анализе (без учета динамических характеристик звеньев в пропорциональной части блока) закон регулирования блока ПР3.31 таков:

$$P_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{\delta} [P_{\text{вых}}(t) - P_3] + \frac{1}{T_H} \int_0^t [P_{\text{вых}}(\tau) - P_3] d\tau$$

При более детальном рассмотрении динамики регулятора получаем структурную схему, приведенную на рис. 1.44,б. В ней сумматор Σ_1 и звено с передаточной функцией $W(s)=k=1$ описывают элемент 1. Статику и динамику делителя ДД1 характеризуют четыре звена: сумматор Σ_2 , усилители с коэффициентами k_1 и $1-k_1$ и апериодическое звено с $W(s)=1/(T_1s+1)$. Это звено учитывает инерционность изменения давления в дроссельном сумматоре ДД1 и в глухой камере В усилителя давления 3. Аналогично описываются статика и динамика делителя ДД2. Сумматор Σ_3 и усилитель с $k \gg 1$ характеризуют работу элемента 3. Наконец, передаточная функция $W(s)=(T_5s+1)^{-1}$ описывает динамику демпферного дросселя в усилителе мощности (демперф вводится для ослабления автоколебаний).

Общая передаточная функция регулятора:

$$W(s) = (1/\delta + 1/T_5s) W_n(s), \text{ где } W_n(s) = (C_4s^2 + C_3s + 1)/(T_5s + \delta)(C_2s^2 + C_1s + 1).$$

Параметры C_1-C_4 зависят от постоянных времени T_1, T_2, T_5 и от коэффициентов k_1, k_2 . Функция $W_n(s)$ отражает отклонения динамических характеристик блока ПРЗ.31 от уравнения теоретического ПИ-регулятора. Верхняя граница ОНР блока ПРЗ.31 равна 0,3 рад/с. Диапазон изменения настроек: $2\% \leq \delta \leq 100\%$ (с помощью ДД2); $100\% \leq \delta \leq 3000\%$ (с помощью ДД1); $0,05 \text{ м} \leq T_n \leq 100 \text{ м}$.

Вторичные приборы системы «Старт»

Эти приборы конструируются на базе элементов УСЭППА. Принцип их построения — компенсация сил, основная погрешность не превышает одного процента от шкалы. Вторичные приборы осуществляют автоматический контроль, регистрацию координат объекта и управление работой системы регулирования. Приборы работают в стандартном диапазоне пневматических сигналов $(0,2-1,0) \cdot 10^5$ Па. Приборы, предназначенные для работы с регуляторами, имеют встроенные станции управления, с помощью которых обеспечивается возможность автоматического ведения процесса, ручного или автоматического программного управления. В станцию управления входят задатчик и переключатель, состоящий из логического устройства на элементах УСЭППА

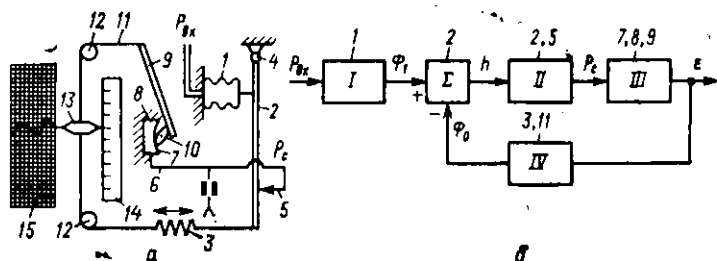


Рис. 1.46. Вторичный прибор системы «Старт»:

а — принципиальная схема измерительного устройства: 1 — сильфон; 2 — рычаг; 3 — пружина обратной связи; 4 — опора; 5 — сопло; 6 — пневмолития обратной связи; 7 — чашечная мембрана; 8 — силовой элемент; 9 — рычаг; 10 — ось; 11 — нить; 12 — ролик; 13 — перо и стрелка; 14 — шкала прибора; 15 — диаграммная бумага; б — принципиальная схема прибора. I—III — преобразователи; IV — устройство обратной связи.

и кнопочного пульта, с помощью которого выполняется переход с одного режима работы на другой.

Схема измерительного устройства, общая для всех вторичных приборов, приведена на рис. 1.46,а. Измеряемое давление $P_{вх}$ подводится к сильфону 1. Усилие, развиваемое сильфоном, уравнивается на рычаге 2 натяжением пружины обратной связи 3. При изменении $P_{вх}$ рычаг 2 поворачивается вокруг опоры 4 и прикрывает сопло 5. Это вызовет изменение давления в линии обратной связи 6, и чашечная мембрана 7 силового элемента 8 также начнет перемещаться. Под действием мембраны рычаг 9 поворачивается вокруг оси 10. К верхнему концу рычага 9 прикреплена лавсановая нить 11, связанная через ролики 12 с пружиной обратной связи 3. Рычаг 9 перемещается до тех пор, пока не скомпенсируются момент силы пружины и момент силы, развиваемой чувствительным элементом — сильфоном 1. Условие равновесия системы: $P_{вх}F_a = kCx$, где F_a — эффективная площадь сильфона; k — передаточный коэффициент рычажного механизма; x — перемещение пружины; C — жесткость пружины.

Таким образом, перемещение рычага 9 однозначно и линейно связано с входным сигналом. Это перемещение передается на показывающую стрелку 13, а если прибор регистрирующий, — на записывающее перо.

В зависимости от назначения, вторичный прибор может иметь одну, две и три измерительные системы, подобные описанной выше.

Структурная схема измерительной части вторичных приборов «Старт» приведена на рис. 1.46,б. В нее входят преобразователи I, II, III, устройство жесткой обратной связи IV и сумматор сил. Преобразователь давления в силу I построен на сифоне 1. На сумматоре, реализованном с помощью рычага (заслонки) 2, вычитаются моменты сил, развиваемых устройством обратной связи (Φ_0) и сифоном (Φ_1). Выходной сигнал сумматора — перемещение h рычага 2. В преобразователе II (сопло 5 и заслонка 2) сигнал h преобразуется в изменения давления P_c в линии 6. В преобразователе III сигнал P_c преобразуется в пропорциональные перемещения рычага 9 и, следовательно, пера регистратора и стрелки показывающего прибора. Устройство обратной связи реализовано нитью 11 и пружиной 3.

В динамическом отношении все элементы схемы можно считать усилительными звеньями при частотах $\omega \leq \omega_H = 0,5$ Гц.

1.6. ЭЛЕМЕНТЫ СТРУЙНОЙ И СТРУЙНО-МЕМБРАННОЙ ТЕХНИКИ

Элементы струйной техники (пневмоники) строятся по принципу аэродинамического взаимодействия струй воздуха. В них отсутствуют подвижные детали, что существенно повышает надежность элементов и устройств пневмоники. Питание элементов осуществляется сжатым воздухом низкого давления, обычно не выше 1000 Па, что повышает экономичность эксплуатации приборов. Элементы и устройства пневмоники выполняют печатным способом, что снижает стоимость приборов.

Для построения элементов пневмоники чаще всего используют два физических явления:

1. Взаимодействие струй воздуха. Направление, а впоследствии и потенциальная энергия результирующей струи, определяются кинетической энергией сталкивающихся струй.

2. Эффект Коанда. Он заключается в «прилипании» струи воздуха к криволинейной поверхности. Такое искривление траектории струи возможно вследствие образования зоны низкого давления между ядром потока и стенкой. Для отрыва струи от поверхности надо создать местное сопротивление или приложить какую-либо силу.

Элементы струйной техники строят и с использованием ряда других аэродинамических эффектов, напри-

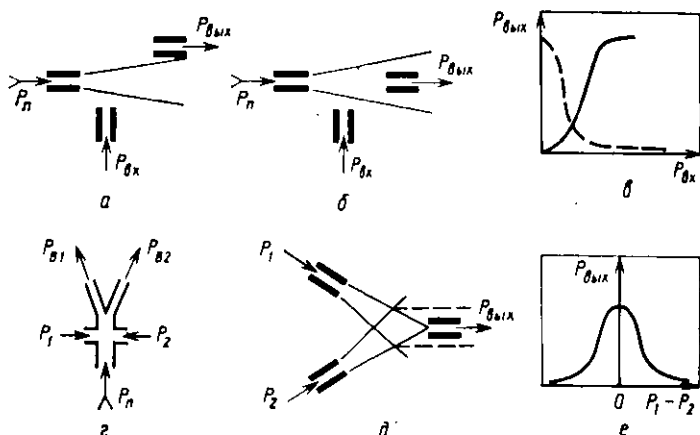


Рис. 1.47. Струйные усилители давления:

а, б — принципиальные схемы прямого и инверсного усилителей; *в* — статические характеристики прямого и инверсного усилителей; *г* — принципиальная схема дифференциального усилителя; *д, е* — принципиальная схема и статическая характеристика элемента сравнения.

мер турбулизации воздушной струи, вытекающей из длинного тонкого канала, образования вихревых потоков, взаимодействия встречных струй и т. п.

Аналоговые элементы пневмоники

Основными элементами этого класса являются усилители давления и мощности. Различают *прямые и инверсные усилители давления*. Принципиальные схемы их приведены на рис. 1.47, *а, б*. Каждый усилитель состоит из трех сопел: в одно подается питание давлением $P_{\text{п}} = 1000$ Па, в другое — входной сигнал $P_{\text{вх}}$, в третьем, приемном сопле, измеряется выходное давление $P_{\text{вых}}$.

В прямом усилителе при $P_{\text{вх}} = 0$ основная струя воздуха из сопла питания не попадает в приемное сопло, и $P_{\text{вых}} = 0$. При $P_{\text{вх}} > 0$ с увеличением кинетической энергии управляющего потока основная струя будет отклоняться, и часть ее начнет попадать в приемное сопло, где кинетическая энергия воздуха преобразуется в давление $P_{\text{вых}}$. С ростом $P_{\text{вх}}$ увеличивается и $P_{\text{вых}}$. Статическая характеристика этого усилителя показана на рис. 1.47, *в* сплошной линией.

В инверсном усилителе при $P_{\text{вх}} = 0$ выходной сигнал максимален, с ростом $P_{\text{вх}}$ давление $P_{\text{вых}}$ убывает. Ста-

тическая характеристика усилителя показана пунктиром на рис. 1.47, в. Такие элементы используют в пневматике и для усиления расхода (мощности).

Дифференциальный усилитель давления состоит из пяти сопел: к двум подаются входные сигналы P_1 и P_2 , два служат приемниками выходного давления, в пятое сопло вводится питание (рис. 1.47, г). Коэффициент усиления такого элемента находят по формуле $k = (P_{в1} - P_{в2}) / (P_1 - P_2)$.

Двухходовый элемент сравнения имеет три сопла: в два подводятся сравниваемые сигналы, в третьем измеряется выходное давление (рис. 1.47, д). Статическая характеристика элемента нелинейна (рис. 1.47, е).

Статические характеристики усилителей давления и расхода нелинейны, и обеспечить стабильное усиление входных сигналов, изменяющихся в широком диапазоне, достаточно сложно. Для получения больших и стабильных коэффициентов усиления строят многокаскадные струйные усилители давления. Они состоят из нечетного числа инверсных усилителей давления и одного прямого усилителя расхода. Принципиальная схема трехкаскадного усилителя показана на рис. 1.48. Он состоит из трех усилителей давления 1—3 и усилителя расхода 4, нагрузочных ламинарных пневмосопротивлений $D_1—D_5$, дроссельного сумматора 5 и дросселя D_0 отрицательной обратной связи. Эта связь вводится для стабилизации работы усилителя и позволяет поддерживать значение коэффициента передачи с погрешностью около 1%. Опорное давление P_0 , вводимое в сумматор, позволяет смещать рабочую точку усилителя на его статической характеристике. Принцип работы многокаскадного уси-

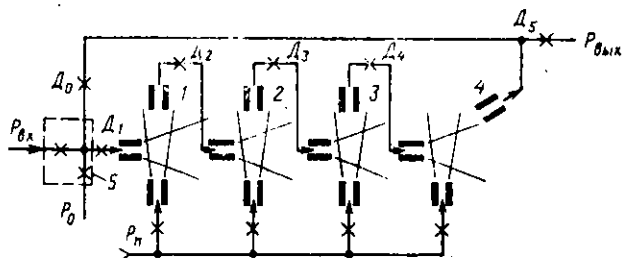


Рис. 1.48. Принципиальная схема трехкаскадного струйного усилителя давления:

1—3 — инверсные усилители давления; 4 — прямой усилитель мощности; 5 — дроссельный сумматор давлений.

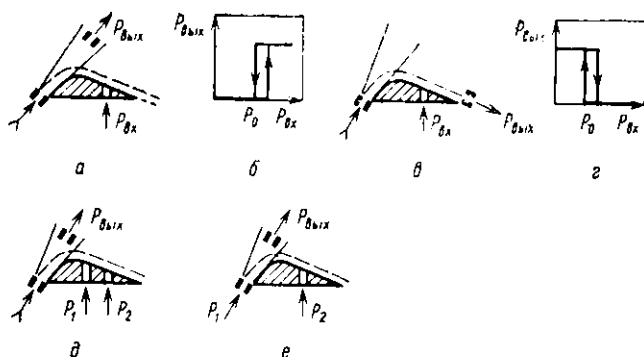


Рис. 1.49. Дискретные элементы пневмоники:

а, б — принципиальная схема и статическая характеристика реле повторения; в, г — то же для реле отрицания; д, е — схемы реализации логических функций двух переменных — дизъюнкции (д) и конъюнкции (е).

лителя очевиден, общий коэффициент передачи каскада из 3—5 усилителей достигает 200—300 (по давлению) и 300—400 (по расходу).

Дискретные элементы пневмоники

Релейные элементы пневмоники основаны на использовании как принципа взаимодействия струй воздуха, так и эффекта Коанда. Для построения реле первого типа используют рассмотренные выше усилители давления с максимально возможными коэффициентами передачи. Релейные элементы, действие которых основано на использовании эффекта Коанда, показаны на рис. 1.49. Реле повторения (рис. 1.49,а) работает следующим образом. Если $P_{вх} < P_0$, то основная струя «прилипает» к телу А и $P_{вых} = 0$. При $P_{вх} > P_0$ наблюдается отрыв струи и $P_{вых} \approx P_{п}$. Форма статической характеристики (рис. 1.47,б), порог срабатывания P_0 и зона гистерезиса зависят от профиля тела А, числа и расположения каналов для ввода сигнала $P_{вх}$, мощности основного потока и ряда других факторов. Из аналогичных элементов конструируется реле отрицания, схема и характеристика которого показаны на рис. 1.49,в, г.

На дискретных элементах пневмоники легко реализуются любые логические функции двух и более дискретных переменных. На рис. 1.49,д, е в качестве примера показаны схемы ИЛИ (дизъюнкция) и И (конъюнкция).

Динамические характеристики элементов струйной техники изучены недостаточно. Известно, что прямые и инверсные усилители являются фактически безынерционными в полосе частот от нуля до нескольких сотен Гц. Частоты среза элементов пневмоники достигают 10—20 кГц (для элементов УСЭППА и АУС — несколько десятков Гц).

Элементы пневмоники изготавливают из пластмасс, керамики, металлов печатным методом, штамповкой, точным литьем, фотохимическим травлением. Объем каждого элемента не превышает 0,5—1,0 см³.

Для изготовления сложных приборов пневмоники применяют элементный, модульный и макромодульный способы монтажа. В первом случае прибор собирают из отдельных элементов. Это усложняет процесс сборки и наладки, поэтому широкого применения такой метод монтажа при изготовлении приборов пневмоники не получил. При модульном монтаже прибор собирают из готовых модулей, представляющих собой плату, на которых печатным способом выполнена определенная функционально законченная схема (суммирования, усиления и т. п.). Модули настраивают на заводе, поэтому отладка прибора упрощается. При макромодульном монтаже схему всего прибора печатают на плате. Настройка прибора производится на заводе, и в схему уже нельзя вносить какие-либо изменения.

Элементы струйно-мембранной техники

Элементы струйной техники позволяют строить достаточно сложные дискретные системы пневмоавтоматики, обладающие небольшими габаритами, существенно большим (по сравнению со схемами из элементов УСЭППА) быстродействием и сравнительно невысокой стоимостью. Однако широкое внедрение струйных элементов и построенных на их основе систем управления в промышленность затруднено по нескольким причинам. Наиболее важная из них — низкий уровень входных и выходных сигналов, принятый в элементах и устройствах пневмоники. Он составляет 1000 Па, что в 100 раз меньше давления, используемого в промышленных системах пневмоавтоматики.

Применение сигнала низкого уровня, с одной стороны, позволяет сократить расход воздуха, необходимый

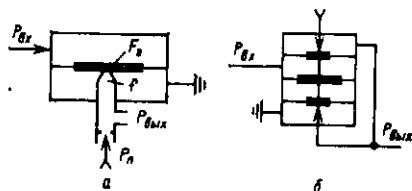
для работы системы, а с другой — требует применения специальных датчиков и исполнительных механизмов, работающих на низком давлении. Создание таких исполнительных механизмов вызывает большие конструкторские трудности. Кроме того, системы, построенные из элементов струйной техники, имеют невысокую помехоустойчивость, а выходные сигналы элементов маломощны, что затрудняет «стыковку» этих элементов. Этих недостатков лишены релейные схемы, построенные на дискретных элементах УСЭППА, однако при этом снижается быстродействие системы и возрастают ее габариты.

Указанные трудности в значительной мере устраняются при использовании элементов комбинированной струйно-мембранной техники. К ним относят дискретные элементы пневмоники и УСЭППА, а также ряд повысителей и понизителей давления, предназначенных для перехода с низкого давления на высокое и наоборот.

При создании какой-либо системы на базе струйно-мембранной техники всю схему обычно делят на две части по уровню используемых пневматических сигналов. При этом основные логические функции системы реализуют на быстродействующих и малогабаритных струйных элементах, работающих на низком давлении воздуха. На выходе такой логической подсистемы устанавливают двухкаскадный повыситель (усилитель) давления и расхода, выходной сигнал которого может вводиться в любой элемент УСЭППА. Для понижения давления входных сигналов, вводимых в логическую подсистему, используют дроссели и специальные понизители давления и расхода. В логических подсистемах часто применяют пассивные схемы, не требующие источников питания. Если такая схема достаточно сложна, ее делят на ряд узлов, соединенных между собой промежуточными усилителями давления.

На рис. 1.50 показаны схемы мембранных усилителей давления и мощности. Особенность элементов состоит в том, что $P_{вх}$ примерно в 100 раз меньше $P_{вых}$. Поэтому для обеспечения баланса сил $P_{вх}F_a = P_{вых}f$, действующих на мембрану усилителя давления, требуется, чтобы эффективные площади F_a и f различались также примерно в 100 раз. В описываемой конструкции усилителя камера отрицательной обратной связи соединена с атмосферой, поэтому f мала и примерно равна площа-

Рис. 1.50. Мембранные усилители (повысители) давления. (а) и мощности (б).



ди сопла. Существует несколько других конструкций повысителей и понизителей давления.

Системы управления, построенные на элементах струйно-мембранной техники, по габаритам, стоимости и быстродействию занимают среднее положение между аналогичными системами, сконструированными на элементах УСЭППА или пневмоники.

1.7. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Исполнительные механизмы предназначены для преобразования изменений давления воздуха P на выходе регулятора в перемещение h регулирующего органа — клапана, заслонки, шибер, крана и т. п. Регулирующий орган изменяет расход потока жидкости, газа, пара и т. п. вводимого в объект управления, и тем самым вызывает изменение регулируемой выходной координаты. По типу привода пневматические исполнительные механизмы делятся на мембранные и поршневые.

Мембранный исполнительный механизм

Схема мембранного исполнительного механизма (МИМа) показана на рис. 1.51, а. Перемещение выходного штока 1, соединенного с регулирующим органом 2, в одну сторону осуществляется силой, которая создается давлением P , в другую — усилием пружины 3. Сигнал P поступает в герметичную мембранную «головку», в которой находится мембрана из прорезиненной ткани тол-

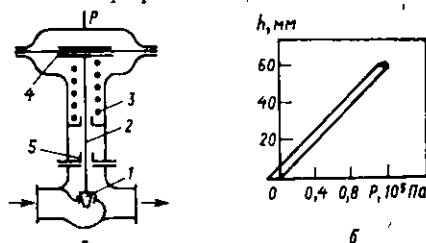


Рис. 1.51. Мембранный исполнительный механизм:

а — принципиальная схема (1 — регулирующий орган; 2 — шток; 3 — пружина; 4 — мембрана; 5 — сальник); б — статическая характеристика.

щиной 2—4 мм с жестким центром. Снизу на мембрану давит пружина 3. МИМы классифицируют по размерам мембранных «головок». МИМы поставляются обычно совместно с регулирующими органами. Так как при снятии давления P мембрана всегда перемещается вверх, то в зависимости от конструкции регулирующего органа различают нормально открытые и нормально закрытые клапаны.

Статические характеристики большинства МИМов близки к линейным (рис. 1.51,б), однако они обладают зоной гистерезиса, составляющей 2—15% от наибольшего значения P . Эта величина зависит от усилий трения в сальнике 5, от перепада давлений на регулирующем органе, от характеристик пружины и эффективной площади мембраны. Перемещения штока h в среднем достигают 50—70 мм, поэтому эффективная площадь F_0 мембраны зависит от h . По мере возрастания F_0 зона гистерезиса уменьшается до 2—3% и практически не влияет на качество переходных процессов в АСР. Однако при этом возрастает объем надмембранной камеры и ухудшаются динамические характеристики цепочки «пневмолиния—МИМ».

В динамическом отношении МИМы с зоной гистерезиса 2—3% можно считать усилительными звеньями при частотах $\omega < \omega_n = 0,3$ рад/с. Если зона гистерезиса составляет 5—8%, то ω_n уменьшается на порядок. Динамика МИМа по каналу «давление воздуха на входе в камеру — перемещение штока» при малых возмущениях приближенно описывается аперриодическим звеном. В общем случае постоянная времени МИМа зависит от перемещения штока h .

Для уменьшения зоны гистерезиса и улучшения динамических характеристик МИМов на исполнительный механизм устанавливают дополнительные усилители мощности, называемые *позиционерами*. Различают позиционеры, работающие по схеме компенсации перемещений и по схеме компенсации сил. В позиционерах обоих типов МИМ охватывается отрицательной обратной связью по положению штока, что исключает влияние на статические характеристики сил трения в сальнике, перепад давлений на регулирующем органе и т. п. Одновременно с этим увеличение расхода воздуха, подаваемого в МИМ, заметно улучшает динамические характеристики последнего.

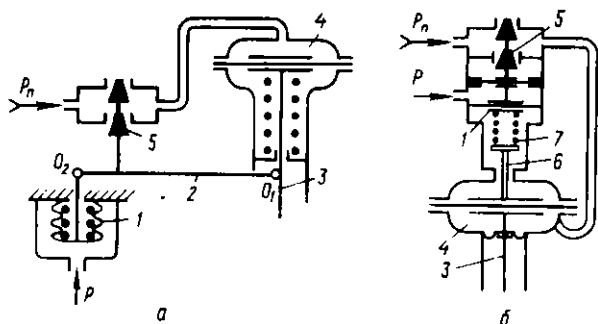


Рис. 1.52. Принципиальные схемы позиционеров:

а — с компенсацией перемещений; *б* — с компенсацией усилий; 1 — чувствительный элемент (сильфон, мембрана); 2 — рычаг; 3 — шток МИМа; 4 — надмембранная камера; 5 — золотник; 6 — толкатель; 7 — пружина обратной связи.

Принципиальные схемы позиционеров обоих типов показаны на рис. 1.52. В позиционере, работающем по принципу компенсации перемещений (рис. 1.52, *а*), сигнал P подается в сильфон 1, связанный рычажным механизмом 2 со штоком 3. При изменении P рычаг вращается относительно опоры O_1 и перемещает золотник 5, изменяя тем самым подачу воздуха в камеру МИМа. Мембрана МИМа занимает новое положение, и рычаг 2 начинает поворачиваться относительно оси O_2 , т. е. начинает работать отрицательная обратная связь. В позиционере, построенном по схеме компенсации сил (рис. 1.52, *б*), функции сильфона 1 выполняет мембрана 1, перемещения которой через золотник 5 влияют на расход и давление воздуха, подводимого в камеру МИМа 4. Перемещения мембраны МИМа через толкатель 6 и пружину отрицательной обратной связи 7 уравновешивают силу, действующую на мембрану со стороны давления P . Позиционеры первого типа используют в МИМах с большими перемещениями штока (40—70 мм), позиционеры с компенсацией усилий — в МИМах с малыми перемещениями.

Поршневые следящие приводы

Поршневые следящие приводы (ПСП) применяют в тех случаях, когда требуется перемещать шток исполнительного механизма на большое расстояние h ($0 \leq h \leq \leq 300$ мм). Для повышения точности и улучшения ди-

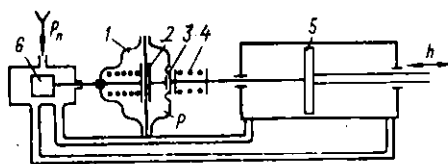


Рис. 1.53. Принципиальная схема пневматического поршневого следящего привода:

1 — исполнительный механизм; 2 — большая мембрана; 3 — малая мембрана; 4 — пружина обратной связи; 5 — поршневой механизм; 6 — золотник.

намических характеристик поршневые приводы снабжают позиционерами, а сами приводы называют следящими.

На рис. 1.53 показана принципиальная схема такого следящего поршневого привода. Он состоит из мембранного блока 1 с большой 2 и малой 3 мембранами; золотника 6 с тремя щелями; поршневого механизма 5 и пружины отрицательной обратной связи 4. При увеличении P золотник смещается влево, и давление питания P_n поступает в левую полость цилиндра 5, перемещая поршень вправо и увеличивая натяжение пружины отрицательной обратной связи до тех пор, пока не наступит равновесие сил, действующих на мембранную систему 2, 3.

Следящие приводы обладают зоной нечувствительности (не выше 1%), полное время перемещения составляет несколько секунд (при отсутствии нагрузки); в области частот $\omega < \omega_n = 0,6$ рад/с их можно рассматривать как усилительные звенья.

ГЛАВА 2

СРЕДСТВА ГИДРОАВТОМАТИКИ

Устройства гидроавтоматики имеют ряд преимуществ перед пневматическими приборами: большая мощность и высокая надежность гидравлических исполнительных механизмов, более высокая скорость распространения сигналов. Однако им свойственны и недостатки, затрудняющие широкое применение их в химической и нефтехимической отраслях промышленности: пожароопасность маслосистемы, относительно высокая стоимость рабочего агента (масла), необходимость монтажа возвратных линий.

В гидроавтоматике в качестве рабочего агента применяют несжимаемые жидкости: минеральное масло

(веретенное, машинное и т. п.), воду. Рабочий агент должен быть дешевым, неядовитым, пожаровзрывобезопасным, не должен вызывать коррозию конструкционных материалов, вязкость его не должна существенно зависеть от температуры среды.

Элементы и приборы гидравлической ветви ГСП находятся в стадии разработки. Поэтому здесь рассматриваются основные элементы и устройства гидроавтоматики, нашедшие применение при автоматизации объектов химической и металлургической отраслей промышленности.

2.1. ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОАВТОМАТИКИ

Дроссели

Для изменения расхода рабочего агента и понижения его давления применяют дроссели. По характеру изменения сечения дроссели делятся на *постоянные* (шайбы, диафрагмы, жиклеры, капилляры) и *переменные* (сопло—заслонка, золотники, игольчатые и конические). Принципиальные схемы дросселей приведены на рис. 1.2.

В зависимости от скорости протекания жидкости дроссели подразделяют на *ламинарные* и *турбулентные*.

Статика переменных дросселей описывается *гидравлической* $\xi = f(h)$ и *расходной* $G = f(h)$ характеристиками. Здесь ξ — гидравлический коэффициент местного сопротивления; h — перемещение подвижного элемента в дросселе от положения закрытия. Коэффициент $\xi = \frac{2\Delta P}{\rho \omega^2}$, где ΔP — перепад давления на дросселе; ρ — удельный вес жидкости; ω — скорость; G — расход жид-

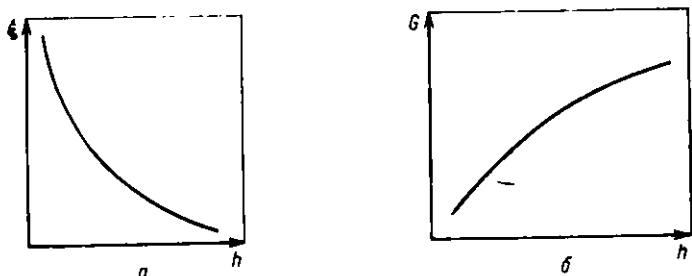


Рис. 2.1. Гидравлическая (а) и расходная (б) статические характеристики переменных дросселей.

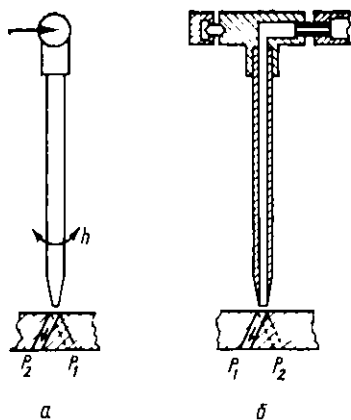


Рис. 2.2. Общий вид (а) и разрез (б) струйной трубки.

кости через дроссель. Примерный вид статических характеристик показан на рис. 2.1.

Линеаризация расходных характеристик переменных дросселей допустима при малых перемещениях h и невысоких перепадах давления (в области ламинарных режимов). Гидравлические

характеристики золотника рассмотрены ниже.

Постоянные дроссели характеризуются безразмерным коэффициентом гидравлического сопротивления ξ и расходом G при фиксированном перепаде ΔP .

Преобразователи перемещения в давление

Наиболее распространенным преобразователем такого типа является *струйная трубка* (рис. 2.2). Рабочий агент давлением питания $P_n = (6-8) 10^5$ Па поступает в трубку, выходит из нее со скоростью 30—40 м/с и попадает в два приемных сопла, расположенных под углом друг к другу. Давление P_n преобразуется в кинетическую энергию струи жидкости, вытекающей из трубки. В приемных соплах эта энергия вновь преобразуется в давления P_1 и P_2 . При $h=0$ струйная трубка занимает среднее положение относительно сопел, и $P_1=P_2$. При перемещении трубки давление в одном из сопел возрастает, а в другом понижается. Статическая характеристика струйной трубки показана на рис. 2.3. Интервал перемещений трубки ($-h_m, h_m$), при которых статическую характеристику можно рассматривать как линейную, составляет доли миллиметра — обычно $\pm (0,4-0,6)$ мм.

В динамическом отношении струйная трубка представляет собой колебательное звено с малой постоянной времени T и $\varepsilon < 1$. Ее передаточная функция имеет вид:

$$W(s) = k / (T^2 s^2 + \varepsilon T s + 1) \quad (2.1)$$

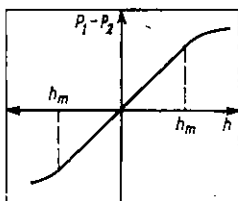


Рис. 2.3. Статическая характеристика струйной трубки.

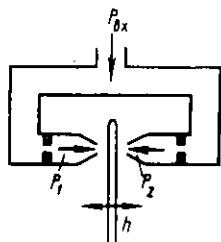


Рис. 2.4. Принципиальная схема дифференциального преобразователя сопло — заслонка.

В интервале частот 0—20 рад/с струйную трубку можно считать усилительным звеном с коэффициентом передачи $k = \operatorname{tg} \alpha$ (рис. 2.3).

Сопло-заслонка. Конструктивно этот элемент аналогичен изучавшемуся ранее пневматическому преобразователю сопло—заслонка. На заслонку в гидравлическом преобразователе действует большое усилие от струи, поэтому иногда применяют частично уравновешенные дифференциальные схемы преобразователей (рис. 2.4).

В области низких частот сопло—заслонка является усилительным звеном с постоянным коэффициентом передачи при $0 < h < 0,05$ мм.

Преобразователи типа сопло—заслонка не получили широкого распространения в устройствах промышленной гидроавтоматики.

Золотники. Этот тип преобразователей представляет собой переменный дроссель: перемещение золотника изменяет проходное сечение и, следовательно, давление $P_{\text{вых}}$ на выходе элемента. Схема одношелевого золотника показана на рис. 2.5.

Для построения золотниковой пары требуется высокая точность обработки уплотняющих поверхностей. Допуски по диаметру составляют обычно микроны.

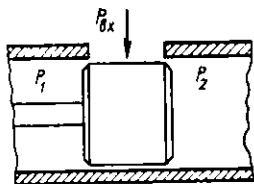


Рис. 2.5. Одношелевой золотник.

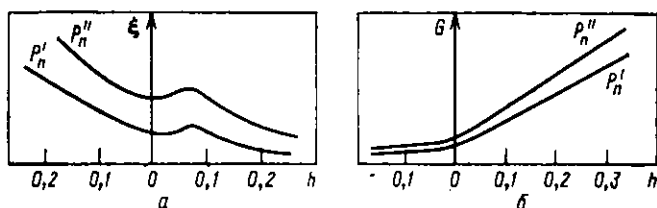


Рис. 2.6. Гидравлическая (а) и расходная (б) статические характеристики однощелевого золотника при давлениях питания P_n и P_n'' ($P_n'' > P_n'$).

Различают одно-, двух- и четырехщелевые золотники различного конструктивного оформления. При перемещении золотник преодолевает силы инерции и трения о стенки, облитерационные усилия и реактивное действие струи жидкости. В преобразователях «перемещение—давление» обычно применяют небольшие усилия, поэтому для уравнивания сил сопротивления приходится использовать более сложные четырехщелевые, золотники.

Статические характеристики однощелевого золотника показаны на рис. 2.6. Отрицательная величина h означает «перекрышу» входного окна золотником. Гидравлические характеристики золотника приведены на рис. 2.6, а. Локальное возрастание гидравлического сопротивления при $h > 0$ объясняется изменением гидродинамического режима протекания жидкости.

Динамические свойства золотника описываются передаточной функцией типа (2.1) с $\epsilon < 1$ и постоянной времени T порядка сотых долей секунды. При $0 < \omega < \omega_n \approx 6$ рад/с золотник является усилительным звеном.

Преобразователи силы в давление

В гидравлических преобразователях перемещения в давление для перестановки золотника, струйной трубки или заслонки требуются большие усилия. Поэтому в гидроавтоматике большее распространение получили преобразователи силы в давление. Принцип суммирования сил позволяет повысить статическую точность работы преобразователей (уменьшить зону нечувствительности, влияние люфтов, сил трения и т. п.).

Преобразователь силы в давление на струйной трубке. Необходимое для перемещения струйной трубки усилие создается с помощью мембранного (сильфонного) узла, к которому подводится давление P_d от датчика или от устройства обратной связи (рис. 2.7). К струйной трубке прилагается и усилие от пружины обратной связи ОС. Для изменения усилия (момента) применяют систему рычагов с подвижным корректором К.

Золотниковый преобразователь. Сила, необходимая для перемещения золотника, создается мембранным (сильфонным) устройством, пружинами или поршнями, на которые действуют давление P_d от датчика (см. рис. 2.5).

Двухкаскадный усилитель предназначен для преобразования усилия от датчика в давление рабочего агента и усиления его мощности (расхода). Принципиальная схема двухкаскадного усилителя показана на рис. 2.8. Усилитель работает следующим образом.

При перемещении струйной трубки 1, например, вправо, возрастает давление в камере А. Следящий золотник 2 перемещается вправо до тех пор, пока давления в камерах А и Б не станут равными, что возможно лишь при среднем положении струйной трубки относительно приемных сопел. Одновременно с этим перемещается вправо и четырехпоршневый золотник 3 второго каскада усиления. При этом рабочий агент давлением

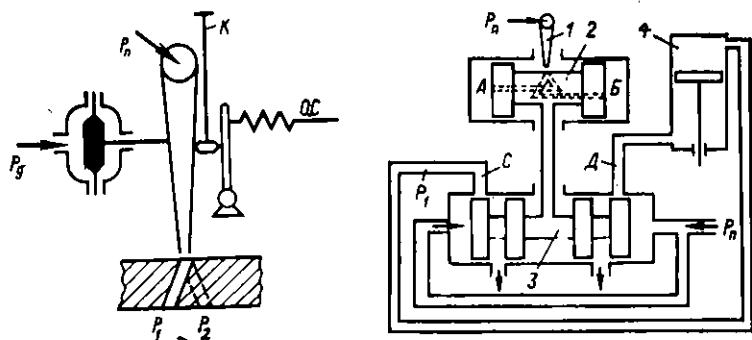


Рис. 2.7. Схема преобразователя силы в давление на струйной трубке (ОС — пружина обратной связи; К — корректор).

Рис. 2.8. Принципиальная схема двухкаскадного усилителя:

1 — струйная трубка; 2 — следящий золотник; 3 — золотник второго каскада; 4 — исполнительный механизм.

P_1 поступает в канал С и далее на поршневой исполнительный механизм 4. Если схема циркуляции жидкости замкнутая, то через канал Д производится ее слив.

Использование второго каскада усиления позволяет увеличить (по сравнению с конструкцией с одной струйной трубкой) коэффициент усиления по давлению в 1,5 раза, а по расходу рабочего агента — в 2 раза. Двухкаскадные усилители применяют в схемах с длинными трубопроводами и крупными исполнительными механизмами.

Статические и динамические характеристики двухкаскадного усилителя аналогичны характеристикам струйной трубки. В области частот $0 \leq \omega \leq \omega_n \approx 6$ рад/с двухкаскадный усилитель близок к усилительному звену.

Сумматоры

В гидроавтоматике используют преимущественно принцип суммирования сил на рычажных устройствах, в частности на струйной трубке (см. рис. 2.7). Одна из суммируемых сил создается, как правило, с помощью упругого элемента, например пружины. На одном рычаге удобно суммировать две силы. Однако в гидравлических регуляторах часто требуется суммировать сигналы от датчика, устройства обратной связи и задатчика. В таких случаях осуществляют предварительное суммирование двух сигналов с помощью пружинных устройств или дополнительных рычагов.

Интеграторы

Простейший гидравлический интегратор представляет собой цилиндр с подвижным поршнем (рис. 2.9, а), который перемещается при появлении перепада давлений в полостях $\Delta P = P_1 - P_2$. Скорость перемещения поршня или штока dh/dt пропорциональна расходу масла G и обратно пропорциональна площади поршня F . Если в

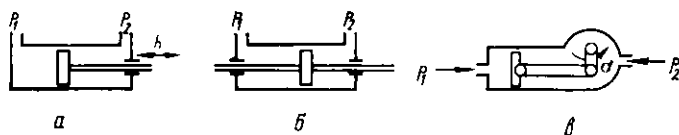


Рис. 2.9. Принципиальные схемы прямоходного (а), прямоходного двухштокового (б) и кривошипного (в) интеграторов.

первом приближении принять, что расход G линейно зависит от перепада ΔP , то $dh/dt \approx C\Delta P/F = k\Delta P$, а передаточная функция устройства $W(s) = h(s)/\Delta P(s) = k/s$, где $k = C/F$, C — расходный коэффициент.

Фактически коэффициент усиления k зависит от знака ΔP . Действительно, при $P_1 - P_2 > 0$ поршень перемещается под действием силы $\Phi_1 = (P_1 - P_2)F + P_2f - \Phi_T$, а при $P_1 - P_2 < 0$ результирующая сила $\Phi_2 = (P_2 - P_1)F - P_2f - \Phi_T$ (где f — площадь штока, Φ_T — сила трения поршня и штока в сальнике).

Для выравнивания скоростей перемещения поршня при разных знаках ΔP применяют двухштоковые интеграторы (рис. 2.9,б) с достаточно большим значением h (до 200 мм).

В полости цилиндра подают масло под высоким давлением — $(6-12) \cdot 10^5$ Па, поэтому для уплотнения штоков применяют набивные сальники и манжеты, в которых возникают значительные силы трения Φ_T . Для уменьшения трения используют кривошипные поршневые интеграторы (рис. 2.9,в) с вращательным движением выходного штока (вала). Максимальный угол поворота штока α обычно равен 90° .

Гидравлические прямоходные и кривошипные интеграторы используют в АСР в качестве исполнительных механизмов (см. ниже).

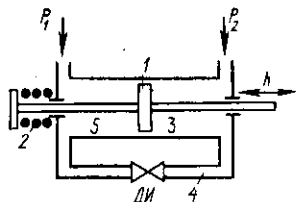
Дифференциаторы

На рис. 2.10 показана принципиальная схема элемента, передаточная функция которого $W(s) = h(s)/\Delta P(s) = kTs/(Ts + 1)$ описывает динамические свойства реального дифференцирующего звена ($\Delta P = P_1 - P_2$). Дифференциатор, называемый иногда изодромным устройством, работает следующим образом.

При появлении разности давлений $P_1 - P_2 > 0$ поршень 1 начинает перемещаться вправо, сжимая пружину

Рис. 2.10. Принципиальная схема дифференциатора:

1 — поршень; 2 — пружина; 3, 5 — полости цилиндра; 4 — обводная линия.



2 и вытесняя часть рабочего агента из полости 3. Небольшое количество жидкости перетекает при этом и через обводную линию 4 с регулируемым дросселем ДИ. Скорость перемещения штока в начальный момент времени пропорциональна величине $P_1 - P_2$. Далее перепад давления $P_1 - P_2$ начинает постепенно уменьшаться как вследствие изменения объемов полостей 5 и 3 и увеличения усилия от пружины 2, так и в результате перетекания части жидкости через дроссель ДИ и действия устройства обратной связи (при использовании изодрома в регуляторе).

Под действием пружины 2 поршень начнет постепенно перемещаться влево, а рабочий агент будет перетекать из полости 5 в полость 3, причем скорость обратного движения штока зависит от степени открытия ДИ. Равновесное состояние достигается при равенстве давлений в полостях 5 и 3 и среднем положении поршня (т. е. отсутствии натяга или сжатия пружины).

Область нормальных режимов работы дифференциатора ограничена частотой $0 \leq \omega < \omega_n \approx 0,2$ рад/с при $T_n < 20$ с или $0 \leq \omega < \omega_n \approx 0,1$ рад/с при $T_n = 80-100$ с. Значение T_n определяется степенью открытия дросселя ДИ.

2.2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Для автоматизации промышленных объектов применяют гидравлические регуляторы, реализующие в области нормальных режимов П-, И-, ПИ-законы. Обобщенная схема гидравлического регулятора представлена на рис. 2.11.

На сумматор 1 поступают сигналы от датчика y , датчика y_0 и устройства обратной связи Φ_5 . Выходной сигнал сумматора — перемещение струйной трубки h — поступает в усилители давления и мощности 2 и 3 (двухкаскадное усиление). Входным сигналом исполни-

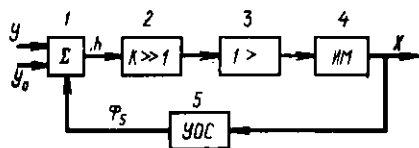
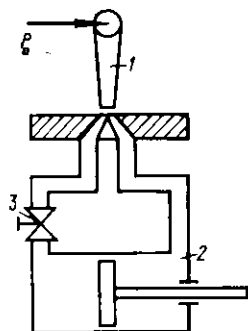


Рис. 2.11. Структурная схема гидравлического регулятора:

1 — сумматор; 2, 3 — усилители давления и мощности; 4 — исполнительный механизм; 5 — устройство обратной связи (УОС).

Рис. 2.12. Принципиальная схема И-регулятора:

1 — струйная трубка; 2 — исполнительный механизм; 3 — регулируемый дроссель.



тельного механизма 4 служит перепад давлений в его полостях $\Delta P = P_1 - P_2$ (см. рис. 2.9). Выходная координата x исполнительного механизма эквивалентна перемещению регулирующего органа (клапана, заслонки). Сигнал x преобразуется устройством отрицательной обратной связи 5 и поступает в сумматор 1.

Передаточные функции элементов АСР таковы: $W_2(s) = k_2$; $W_3(s) = k_3$; $W_4(s) = k_4/s$. Передаточная функция всего регулятора имеет вид:

$$W(s) = \frac{k_2 k_3 k_4 / s}{1 + k_2 k_3 k_4 W_5(s) / s} = \frac{1/s}{1/k_2 k_3 k_4 + W_5(s) / s} \approx \frac{1}{W_5(s)}$$

Произведение $k_2 k_3 k_4$ обычно невелико ($k_2 \approx 5-20$, $k_3 = 1-2$; $k_4 < 1$), поэтому соотношение $W(s) \approx 1/W_5(s)$ носит приближенный характер, хотя динамические свойства регулятора существенно зависят от вида $W_5(s)$. Рассмотрим три основных типа гидравлических регуляторов, реализующих разные законы.

И-регулятор. Конструкция такого регулятора очень проста (рис. 2.12). При малом расстоянии от струйной трубки до исполнительного механизма применяют однокаскадный усилитель, при большом — двухкаскадный. Как видно из рисунка, в И-регуляторе нет устройства обратной связи, т. е. $W_5(s) = 0$. Передаточная функция регулятора при $0 \leq \omega \leq \omega_H = 3$ рад/с имеет вид:

$$W(s) = C_0/s \text{ где } C_0 = k_2 k_3 k_4 \quad (2.2)$$

Параметром настройки регулятора служит переменный дроссель 3, установленный на одном из трубопроводов для подвода рабочего агента к исполнительному механизму и позволяющий изменять величину k_4 (давление жидкости).

Гидравлические И-регуляторы достаточно широко применяют для стабилизации параметров малоинерционных промышленных объектов с небольшими значениями времени запаздывания.

П-регулятор. Для реализации пропорционального закона регулирования используют механическую или

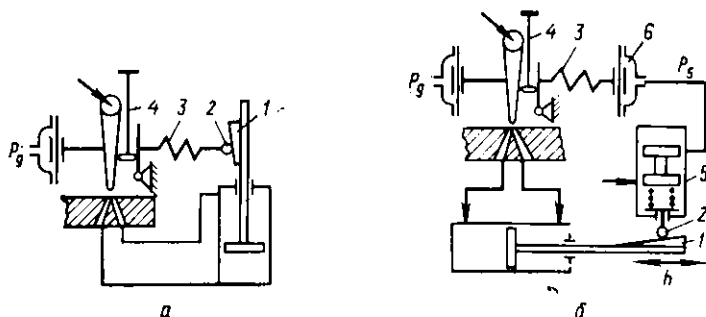


Рис. 2.13. Принципиальные схемы П-регуляторов с механической (а) и дистанционной (б) обратной связью:

1 — лекало; 2 — ролик; 3 — пружина обратной связи; 4 — корректор; 5 — золотник; 6 — мембранный преобразователь давления в силу.

гидравлическую отрицательную обратную связь. П-регулятор с механической обратной связью располагают непосредственно с исполнительным механизмом (рис. 2.13,а). Для простоты на схеме не показан второй каскад усиления. На выходном штоке исполнительного механизма закреплено лекало 1 с роликом 2 и пружиной обратной связи 3. При перемещении штока исполнительного механизма x меняется положение ролика и, следовательно, усилие Φ_5 , действующее через корректор 4 на струйную трубку со стороны пружины 3. Изменение усилия Φ_5 прямо пропорционально перемещению штока исполнительного механизма и положению корректора 4. Таким образом, $W_5(s) = \Phi_5(s)/x(s) \approx k_5$.

На рис. 2.13,б показана схема П-регулятора с гидравлической (дистанционной) обратной связью. Перемещения ролика 2 по лекалу 1 преобразуются в пропорциональное изменение давления P_5 в золотниковом элементе 5. Давление P_5 поступает в сильфонное (мембранное) устройство 6, выходной сигнал которого — усилие Φ_5 — действует на струйную трубку. В диапазоне частот $[0,5]$ рад/с устройство обратной связи эквивалентно усилительному звену и описывается уравнением $\Phi_5 = k_5 x$.

Динамика гидравлического П-регулятора с жесткой обратной связью (механической или гидравлической) при относительно небольших значениях $k_2 k_3 k_4$ описывается передаточной функцией

$$W(s) = k_2 k_3 k_4 / (s + k_2 k_3 k_4 k_5) = k_0 / (T_0 s + 1) \quad (2.3)$$

ПИ-регулятор. На рис. 2.14,а показана принципиальная схема гидравлического регулятора, приближенно реализующего ПИ-закон регулирования. Регулятор состоит из струйной трубки 1, преобразователя 2, усилителя (на рисунке не показан), исполнительного механизма 3, изодромного устройства 4 и устройства обратной связи 5. Изодромное устройство включают в рассечку соединительной линии, связывающей усилитель и исполнительный механизм. Выходной шток изодрома связан с устройством отрицательной обратной жесткой связи. Регулятор работает следующим образом.

а — принципиальная схема; б — структурная схема; 1 — струйная трубка; 2 — преобразователь перемещения в давление; 3 — исполнительный механизм; 4 — изодромное устройство; 5 — устройство жесткой обратной связи.

кращению движения струйной трубки. Далее начинает действовать изодромное устройство. Его пружина находится в растянутом положении и стремится переместить поршень влево. Скорость движения поршня определяется степенью открытия дросселя ДИ изодрома. Постепенно происходит ослабление сжатия пружины обратной связи, и струйная трубка вновь начнет смещаться вправо, т. е. действия изодромного устройства как бы имитируют процесс возрастания сигнала P_d датчика, что вызовет новое перемещение штока исполнительного механизма влево и изменение регулирующего воздействия x , направленного на уменьшение P_d . Подобные движения в системе продолжаются до тех пор, пока струйная трубка не займет среднее положение относительно приемных сопел, а усилие от пружины изодрома не будет равно нулю. При этом сигналы от датчика и задатчика будут равны.

Структурная схема гидравлического ПИ-регулятора показана на рис. 2.14,б. Передаточная функция регулятора имеет вид:

$$W(s) = \frac{k_2 k_3 k_4 / s}{1 + k_2 k_3 k_4 k_5 k T_H s / (T_H s + 1) s} = \frac{k_0 (T_H s + 1)}{s T_H (T_0 s + 1)} \quad (2.4)$$

где $1/T_H \approx 0$ (так как обычно $T_H > 20-50$ с); $T_0 = 1/k_2 k_3 k_4 k_5$; $k_0 = 1/k_5$ — коэффициент усиления регулятора. Передаточная функция «балластного» звена $(T_0 s + 1)^{-1}$ искажает частотные характеристики гидравлического регулятора. Область нормальных режимов работы регулятора не превышает диапазона частот $0 \leq \omega < \omega_H \approx 0,1$ рад/с при $T_H < 20-30$ с и небольших возмущающих воздействиях, при которых поршень изодрома не достигает упоров (ход поршней изодромного устройства и исполнительного механизма различен).

Рабочий диапазон изменения настроечных параметров: диапазон дросселирования (время изодрома) 5—60 с или 30—600 с (для разных конструкций изодромного устройства), коэффициент усиления — от 1 до 10.

Гидравлические исполнительные механизмы предназначены для преобразования командного перепада давления $P_1 - P_2$ в механическую энергию выходного штока, соединенного с регулирующим органом. Принципиальные схемы гидравлических исполнительных механизмов (ГИМ) приведены выше, на рис. 2.9. Серийно выпускают ГИМ двух видов: прямоходные с поступательным движением выходного штока (см. рис. 2.9,а)

типа СПГП и кривошипные с вращательным движением выходного вала (см. рис. 2.9, в) типа СПГК.

Диаметры поршней исполнительных механизмов СПГП и СПГК могут быть равны 80, 120 и 150 мм. При давлении $P_1 - P_2 = 12 \cdot 10^5$ Па на штоке СПГП развиваются усилия 5,7; 12,8 и 20,1 кН для разных диаметров поршней (при движении поршня в сторону выходного штока). При обратном движении усилие уменьшается соответственно на 5—10%. Максимальный ход поршня равен 200 мм, время перемещения при наличии двухкаскадного усилителя — от 7 до 25 с. Средние крутящие моменты на валу СПГК равны 0,65; 1,50 и 2,35 Н·м. Угол поворота вала 90° ; время полного поворота при использовании двухкаскадного усилителя и при $P_1 - P_2 = 8 \cdot 10^5$ Па составляет от 7 до 25 с, в зависимости от диаметра поршня ГИМа.

Динамические свойства системы «струйная трубка — усилитель — нагруженный ГИМ» в интервале частот 0—3 рад/с могут быть аппроксимированы передаточной функцией интегрирующего звена (при длине маслопроводов не более 1 м и диаметре 12 мм). Коэффициент k_4 передаточной функции ГИМа зависит от многих факторов: направления движения поршня, нагрузки на его валу, гидравлического сопротивления линии, температуры масла и т. п. Гидравлические исполнительные механизмы в П- и ПИ-регуляторах охватываются обратной связью, поэтому небольшие вариации k_4 практически не сказываются на качестве переходных процессов.

В гидравлических регуляторах и устройствах рассмотренного типа в качестве рабочего агента используют масло под давлением $P_n = (6 - 12) \cdot 10^5$ Па. Для группы регуляторов устанавливают маслбак, на котором крепят насосы и вспомогательное оборудование (фильтры, спускная и предохранительная арматура). От насосов и бака прокладывают напорные и сливные трубопроводы, к которым подсоединяют все регуляторы. На вертикальных участках маслопроводов необходимо устанавливать обратные и пружинные клапаны, уравнивающие статическое давление масла и предотвращающие его самопроизвольный слив.

2.3. КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Выше рассматривались основные устройства гидроавтоматики. К их достоинствам можно отнести простоту

построения интегрирующих элементов, возможность получения больших перестановочных усилий или моментов на выходном валу исполнительного механизма, высокую надежность исполнительных механизмов. Существенные недостатки гидравлических элементов — сложность построения сумматоров, узкий диапазон изменения коэффициентов усиления (от 1 до 10), трудность установления малого времени издрорма (для $T_{из}$ < 5—20 с). Кроме того, гидравлические регуляторы работают только с датчиками, имеющими силовой выходной сигнал.

Построение элементов с большими коэффициентами усиления и суммирование любого числа сигналов сравнительно легко и просто осуществляются с помощью средств электронной техники. У большинства существующих датчиков — электрический выходной сигнал, что упрощает применение электронных регуляторов. Однако в этих регуляторах установлены малонадежные исполнительные механизмы с постоянной скоростью вращения. Наличие релейных элементов в схемах электронных регуляторов приводит к появлению автоколебательных режимов работы АСР.

В связи с указанными достоинствами и недостатками гидравлических и электронных устройств становится очевидной целесообразность построения комбинированных регуляторов на гидравлических и электронных элементах. Измерительную и усилительную части комбинированных регуляторов строят на электронных элементах, а силовую (т. е. усилители мощности и исполнительный механизм) — на гидравлических.

Рассмотрим кратко две конструкции комбинированных регуляторов — завода «Теплоавтомат» и Московского завода тепловой автоматики (МЗТА). Регуляторы отличаются применяемым рабочим агентом (масло и вода) и построением устройств обратной связи.

Электронно-гидравлические регуляторы завода «Теплоавтомат»

Структурная схема регулятора изображена на рис. 2.15. Разберем кратко принцип действия и динамические характеристики каждого из его элементов.

Регулятор работает с датчиками, имеющими унифицированный электрический сигнал переменного тока 0,5 мА. Число датчиков — не выше трех. Сигналы y_1 —

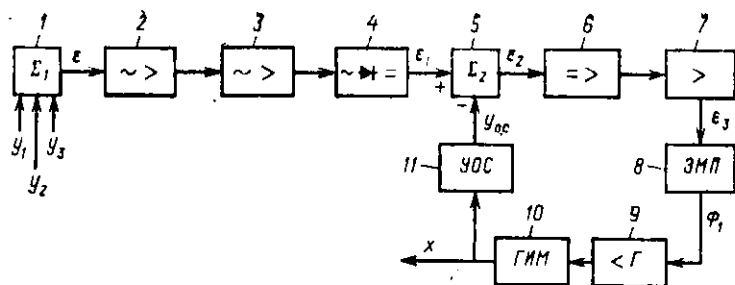


Рис. 2.15. Структурная схема электронно-гидравлического регулятора завода «Теплоавтомат»:

1 — сумматор; 2, 3 — усилители переменного тока; 4 — выпрямитель; 5 — сумматор сигналов постоянного тока; 6 — усилитель напряжения постоянного тока; 7 — усилитель мощности; 8 — электромеханический преобразователь (ЭМП) электрического сигнала в силу; 9 — гидравлический двухкаскадный усилитель; 10 — гидравлический исполнительный механизм (ГИМ); 11 — устройство обратной связи (УОС).

u_3 от датчиков подаются на сумматор Σ_1 , построенный на делителях-потенциометрах. В динамическом отношении сумматор представляет собой усилительное звено по каждому из входов. Сигнал $\varepsilon = y_1 + y_2 + y_3$ переменного тока поступает на двухкаскадный фазочувствительный усилитель (элементы 2 и 3), собранный на электронной лампе. Переменный ток преобразуется в постоянный на диодной схеме выпрямителя 4. Динамика элементов 2—4 удовлетворительно описывается передаточной функцией $W_1(s) = k_1 / (T_1 s + 1)$, где $k_1 \approx 25$, $T_1 \approx 0,15$ с.

Сумматор Σ_2 предназначен для сравнения сигналов постоянного тока ε_1 от выпрямителя 4 и u_{oc} от устройства обратной связи 11. Он построен на делителях и в динамическом отношении представляет собой усилительное звено.

Усилители напряжения и тока 6 и 7 построены на лампах; передаточная функция их имеет вид: $W_2(s) = k_2 / (T_2 s + 1)$, где $T_2 \approx 0,01$ с, т. е. можно положить $W_2(s) \approx k_2$ в области низких частот.

Электромеханический преобразователь (ЭМП) 8 предназначен для преобразования электрического сигнала ε_3 усилителя 7 в силу Φ_1 , воздействующую на струйную трубку (рис. 2.16,а). ЭМП состоит из двух катушек, через которые протекает выходной ток усилителя 7 и плунжера, соединенного со струйной трубкой. В зависимости от величины и знака ε_3 изменяются сила Φ_1 и ее знак, что приводит к смещению струйной трубки вправо или влево.

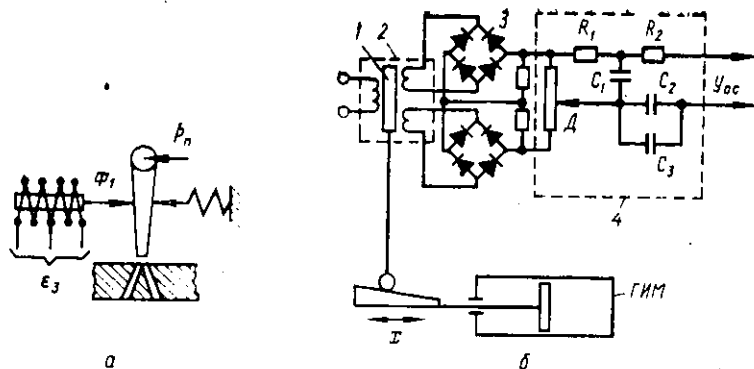


Рис. 2.16. Схемы узлов электронно-гидравлического регулятора завода «Теплоавтомат»:

а — электромеханический преобразователь и струйная трубка; б — гидравлический исполнительный механизм (ГИМ) и устройство обратной связи; 1 — плунжер; 2 — датчик обратной связи; 3 — выпрямитель; 4 — устройство обратной связи.

Гидравлический усилитель 9 содержит, кроме струйной трубки, еще следящий золотник и усилитель мощности. Динамические характеристики ЭМП и гидравлического усилителя могут быть описаны передаточной функцией

$$W_3(s) = k_3 k'_3 \exp\{-\tau_3 s\} / (T_3^2 s^2 + T_3 \varepsilon s + 1)$$

где k_3 — коэффициент усиления ЭМП; τ_3 — время запаздывания сигнала в ЭМП; k'_3 — коэффициент усиления элемента 9; $0 < \varepsilon < 1$. При $0 < \omega < 0,3$ рад/с произведения $T_3^2 \omega^2$, $T_3 \varepsilon \omega$ малы по сравнению с единицей. Тогда $W_3(s) \approx k_3 k'_3 \exp\{-\tau_3 s\}$.

В качестве исполнительного механизма 10 в регуляторе применяют гидравлический прямоходный или кривошипный интегратор (ГИМ). При значительном удалении ГИМ от усилителя 9 (порядка нескольких десятков метров) необходимо учитывать динамические свойства трубопроводов, по которым протекает масло. В первом приближении динамику трубопроводов учитывают введением в передаточную функцию $W_4(s)$ множителя $\exp\{-\tau_{\text{л}} s\}$ (где $\tau_{\text{л}}$ — время запаздывания в линии), т. е. $W_4(s) = k_4 \exp\{-\tau_{\text{л}} s\} / s$.

Устройство отрицательной обратной связи 11 состоит из нескольких элементов (рис. 2.16, б). Перемещение x

штока ГИМ приводит к изменению положения плунжера 1 дифференциально-трансформаторного датчика обратной связи 2. Выходной сигнал датчика поступает на диодный выпрямитель 3. Динамика датчика 2 и выпрямителя характеризуется передаточной функцией $W_5(s) = k_5/(T_5s + 1)$, где $T_5 < 0,1$ с.

Сигнал постоянного тока от выпрямителя подводится непосредственно к зажимам устройства обратной связи 4, представляющего собой дифференцирующий $R-C$ -контур. Сопротивление R_1 и емкость C_1 образуют в нем вспомогательный фильтр для отделения гармоник частотой ~ 100 Гц.

Динамика $R-C$ -контура описывается передаточной функцией реального дифференцирующего звена: $W_5(s) = kT_5s/(T_5s + 1)$. Для изменения времени изодрома T_n служит сменное сопротивление R_2 . Значение T_n может варьироваться в диапазоне от 2 до 500 с.

Найдем передаточную функцию регулятора с учетом того, что $\tau_3 + \tau_n < 0,1$ с; при $0 \leq \omega < 0,1$ рад/с произведения $T_1\omega$, $T_2\omega$, $T_5\omega$, пренебрежимо малы;

$$\exp\{-0,1i\omega\} \approx 1, \text{ а } kk_2k_3k_3^1k_4k_5T_n \gg 1:$$

$$W(s) = \frac{W_1(s) W_2(s) W_3(s) W_4(s)}{1 + W_2(s) W_3(s) W_4(s) W_5(s)} \approx \frac{k_5(T_5s + 1)}{s(T_5s + 1)}$$

$$\text{где } T_5 = 1/(kk_2k_3k_3^1k_4k_5); \quad k_5 = k_1/(kk_5T_n).$$

Амплитудно-фазовая характеристика электронно-гидравлического регулятора близка к частотным характеристикам теоретического ПИ-регулятора в интервале частот $0 \leq \omega < \omega_n \approx 0,1$ рад/с. В общем случае граница области нормальных режимов регулятора зависит от значений T_n и k .

Комбинированный регулятор может реализовать интегральный закон. В этом случае $W_5(s) = 0$, т. е. отсутствует устройство обратной связи (для этого делитель D выводится вверх, как на рис. 2.16,б). При сделанных ранее допущениях о малости T_1 , T_2 и $\tau_3 + \tau_n$ находим передаточную функцию регулятора:

$$W(s) = W_1(s) W_2(s) W_3(s) W_4(s) \approx k_6/s$$

$$\text{где } k_6 = k_1k_2k_3k_3^1k_4.$$

Для построения P -регулятора необходимо закоротить конденсаторы C_2 и C_3 в устройстве обратной связи

4 (рис. 2.16,б). Тогда передаточная функция устройства будет иметь вид: $W_5(s) = k/(T_0s + 1)$, где $T_0 < 0,1$ с, а коэффициент усиления k зависит от положения делителя Д. Учитывая малость величин T_0 , T_1 , T_2 , T_5 и $\tau_3 + \tau_4$ при $0 \leq \omega < 0,1$ рад/с, получим:

$$W(s) = k_1 k_2 k_3 k_4' / (s + k k_2 k_3 k_4') = k_6 / (T_6 s + 1)$$

$$\text{где } k_6 = k_1 / (k k_5); \quad T_6 = 1 / (k k_2 k_3 k_4' k_5).$$

В электронно-гидравлических регуляторах завода «Теплоавтомат» струйная трубка, следящий усилитель второго каскада и ЭМП крепятся непосредственно на поршневом исполнительном механизме, который частично погружен в маслобак. Система маслоснабжения гидравлической части регулятора индивидуальная, т. е. каждый регулятор имеет свой насос. Электронная часть регулятора оформлена в виде отдельного блока и крепится на щите управления. В этом же блоке находятся органы настройки параметров регулятора — коэффициента усиления k и времени изодрома $T_{из}$.

Электронно-гидравлический регулятор системы «Кристалл» МЗТА

Комбинированный регулятор этого типа предназначен для автоматизации котельных установок малой мощности, печей и других объектов с небольшим числом стабилизируемых параметров. Гидравлическая часть регулятора работает на воде давлением $(1,1—1,6) \cdot 10^5$ Па; расход ее составляет 80—120 л/ч.

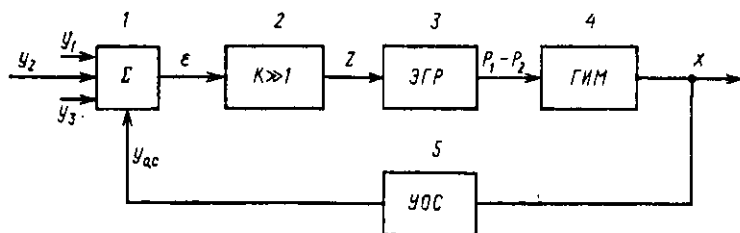


Рис. 2.17. Структурная схема электронно-гидравлического регулятора системы «Кристалл»:

1 — сумматор сигналов переменного тока; 2 — двухкаскадный усилитель напряжения и мощности; 3 — электрогидравлическое реле (ЭГР); 4 — гидравлический исполнительный механизм (ГИМ); 5 — устройство обратной связи (УОС).

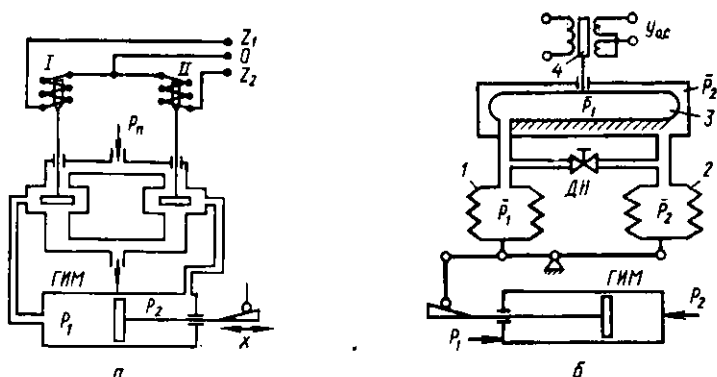


Рис. 2.18. Принципиальные схемы элементов регулятора системы «Кристалл»:

а — электрогидравлическое реле; *б* — устройство обратной связи; *I, II* — катушки электромагнита; *1, 2* — сильфоны; *3* — мембранная коробка; *4* — плунжер дифференциально-трансформаторного датчика.

Структурная схема регулятора системы «Кристалл» приведена на рис. 2.17. Регулятор работает с датчиками, имеющими электрический унифицированный выходной сигнал 0—5 мА переменного тока. На блок суммирования *1* поступают сигналы от двух датчиков, задатчика и устройства обратной связи. Небаланс $e = y_1 + y_2 + y_3 + y_{0.e}$ вводится в полупроводниковый фазочувствительный усилитель *2*, состоящий из двух каскадов (напряжения и мощности). В динамическом отношении усилитель можно рассматривать как апериодическое звено с постоянной времени $T_1 < 0,1$ с.

Электрогидравлическое реле (ЭГР) *3* состоит из двух электромагнитов, сердечники которых связаны с двухпозиционными клапанами, открывающими или закрывающими отверстия для подачи воды в одну из полостей гидравлического исполнительного механизма *4*. Схема ЭГР приведена на рис. 2.18, *а*. Выходной ток *z* усилителя *2* протекает через катушку *I* либо через катушку *II*, в зависимости от фазы сигнала *e*. Вследствие этого вода давлением P_n поступает в одну из полостей ГИМа, на выходном штоке которого закреплено лекало с роликом устройства обратной связи *5*. Входной сигнал ЭГР — разность напряжений $z_1 - z_2$ на зажимах катушек *I* и *II*, выходная координата — перепад давлений $P_1 - P_2$ в полостях ГИМа. Статическая характеристика ЭГР имеет зоны нечувствительности и гистерезиса.

Устройство обратной связи (УОС) выпускают в двух модификациях. Для реализации П-регулятора используют жесткую обратную связь, представляющую собой дифференциально-трансформаторный датчик с передаточной функцией $W'_5(s) \approx k$. Плунжер датчика перемещается роликом, который катится по лекалу ГИМ. Сигнал от датчика $y_{о.с}$ вводится в сумматор 1 (см. рис. 2.17).

Для построения ПИ-регулятора используется пневматическое изодромное устройство, выходной шток которого связан с плунжером дифференциально-трансформаторного датчика (рис. 2.18,б). Перемещение ролика по лекалу ГИМ приводит к сжатию и растяжению сильфонов 1 и 2 и деформации под действием перепада давлений $P_1 - P_2$ мембранного устройства 3. Верхняя часть 3 подвижна и связана с плунжером 4 дифференциально-трансформаторного датчика. Дроссель ДИ, соединяющий сильфоны, служит для перетока воздуха при наличии перепада давлений $P_1 - P_2$. Пневматическое устройство, показанное на рис. 2.18,б, работает так же, как и гидравлический изодром. Передаточная функция его $W_5(s) = \delta T_{и} s / (T_{и} s + 1)$. Значение $T_{и}$ зависит от степени открытия дросселя ДИ и изменяется от 5 до 1500 с.

Передаточная функция дифференциально-трансформаторного датчика в области низких частот может быть принята равной $W'_5(s) \approx k$.

Регулятор содержит релейный элемент, однако в некоторых режимах работы (называемых скользящими) его влияние можно не учитывать. Приближенно в области низких частот $0 \leq \omega < 0,1$ рад/с регулятор системы «Кристалл» может реализовывать П-, И- (с постоянной скоростью движения ГИМ) или ПИ-закон регулирования.

НАДЕЖНОСТЬ СРЕДСТВ ПНЕВМО- И ГИДРОАВТОМАТИКИ

3.1. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

Основные определения и понятия

Под *элементом* в теории надежности понимают некоторое техническое устройство, рассматриваемое как одно целое. Например, к числу элементов можно отнести первичные преобразователи, регуляторы, усилители и т. п. Каждое из перечисленных устройств состоит из ряда деталей и узлов, но при изучении вопросов надежности его считают неделимым.

Несколько элементов, соединенных определенным образом для выполнения тех или иных функций, образуют *систему*. К системе может относиться также и ремонтный или эксплуатационный персонал.

Под *надежностью элемента* понимают его способность выполнять заданные функции в определенных условиях эксплуатации в течение требуемого промежутка времени t . Надежность есть качественное понятие, в существенной мере базирующееся на определениях *работоспособности* и *отказа* элемента.

Элемент называют *работоспособным*, или *исправным*, если его характеристики $y_1, y_2, \dots, y_n$ удовлетворяют неравенствам

$$y_{1*} < y_1(t) < y_1^*, y_{2*} < y_2(t) < y_2^*, \dots \\ \dots, y_{n*} < y_n(t) < y_n^* \quad (3.1)$$

где граничные значения $y_{1*}, y_1^*, y_{2*}, y_2^*, \dots, y_{n*}, y_n^*$ заранее задаются техническими условиями эксплуатации элемента.

Например, при монтаже устройств пневмоавтоматики проверяют герметичность пневмолиний под давлением $P(t)$. Линии считаются исправными, если скорость снижения давления меньше некоторого заданного значения C_1 , т. е. $0 \leq dP/dt \leq C_1$.

Назовем АСР работоспособной, если при неизменных динамических характеристиках всех ее элементов и фиксированном возмущении справедливо неравенство $y_{1*} < y_1(t) < y_1^*$, где y_1 — регулируемая координата

объекта (см. рис. В.1); $y_1^* - y_{1*}$ — диапазон допускаемых технологическим регламентом отклонений y_1 .

Событие, заключающееся в нарушении хотя бы одного из неравенств (3.1) и приводящее к потере работоспособности элемента, называют его *отказом*, или *выходом из строя*. Отказы обусловлены действием большого числа неизвестных факторов и происходят в случайные моменты времени. Поэтому и сам отказ трактуется как случайное событие. Изучением закономерностей возникновения и устранения этих случайных событий занимается теория надежности, базирующаяся на аппарате теории вероятностей и математической статистики. При этом во всех количественных описаниях и исследованиях, осуществляемых в рамках статистической теории надежности, центральное место занимает определение отказа элемента, так как результаты оценки надежности существенно зависят от правильного и обоснованного выбора самих характеристик $y_1, y_2, \dots, y_n$, их числа n и задания граничных значений $y_{1*}, y_1^*, y_{2*}, y_2^*, \dots, y_{n*}, y_n^*$ в неравенствах (3.1).

Различают отказы *зависимые* и *независимые*. Причиной появления зависимого отказа элемента является выход из строя некоторого другого элемента. Например, при разрыве трубопровода, по которому подают сжатый воздух для питания устройств пневмоавтоматики, происходит большое число зависимых отказов АСР и приборов. Возникновение независимых отказов не связано с надежностью или ненадежностью других элементов.

Отказ называют *полным*, если перестали выполняться все n неравенств (3.1), и *частичным*, если только некоторые характеристики элемента не удовлетворяют предъявляемым требованиям. В дальнейшем понятие частичного отказа не используется; считается, что элемент может быть в состоянии отказа или работоспособности.

По характеру проявления отказы разделяют на *внезапные* и *постепенные*. Первые вызываются резкими, катастрофическими изменениями параметров элементов, его поломками, разрушениями. Примерами внезапных отказов служат разрывы мембран и пневмолиний, засорение дросселей и т. п. При постепенных отказах наблюдается плавное изменение характеристик элемента в результате износа или старения его отдельных частей, например, потери мембраной эластичности, потери пружины упругости.

жиной упругости и т. п. Следует отметить, что внезапный выход из строя элемента может быть обусловлен постепенным ненаблюдаемым отказом некоторых частей или деталей. Поэтому деление отказов на постепенные и внезапные является условным и зависит от возможностей контроля изменений характеристик $y_1, y_2, \dots, y_n$ во времени.

По времени существования отказы классифицируют на *устойчивые* и *перемежающиеся*. Устойчивые отказы устраняются только путем ремонта элемента. Перемежающиеся отказы могут исчезать самопроизвольно и появляться вновь.

Элементы делятся на *восстанавливаемые* и *невосстанавливаемые*. Первые после каждого отказа могут быть отремонтированы и доведены до полного работоспособного состояния. Невосстанавливаемые элементы предназначены для однократного применения (снаряды, спички и т. п.). К ним относятся и элементы многократного применения, ремонт которых экономически неоправдан и поэтому не производится (конденсаторы, мембраны, электролампы и т. п.).

Понятие надежности в широком смысле определяется четырьмя свойствами: безотказностью, ремонтпригодностью, долговечностью и сохраняемостью.

Под *безотказностью* понимают свойство элемента непрерывно (т. е. без ремонта) сохранять работоспособность в течение заданного отрезка времени. Безотказность элемента формируется в процессе его конструирования и изготовления и существенно зависит от режима эксплуатации. Например, безотказность средств пневмоавтоматики заметно снижается при увеличении давления питания и повышении температуры окружающего воздуха.

Свойство элемента, заключающееся в его приспособленности к обнаружению и устранению отказов путем выполнения планово-предупредительных и капитальных ремонтов, называют *ремонтпригодностью*. Это понятие применимо только к восстанавливаемым элементам. Ремонтпригодность элемента зависит от организации его эксплуатации и ремонта, а также от квалификации ремонтного персонала. Поэтому при анализе ремонтпригодности элемента фактически рассматривают систему элемент — ремонтный персонал.

Под *долговечностью* понимают свойство элемента

сохранять работоспособность до окончания срока службы с необходимыми перерывами для выполнения плановых ремонтов и восстановления после отказов. Срок службы элемента равен календарной продолжительности его эксплуатации до момента возникновения некоторого предельного состояния, заранее указанного в технической документации. При исследовании надежности средств пневмо- и гидроавтоматики понятие долговечности не играет существенной роли, так как ввиду невысокой стоимости их заменяют новыми гораздо быстрее, чем наступает физический износ (предельное состояние).

Сохраняемость — это свойство элемента оставаться работоспособным в течение всего периода хранения и транспортировки в заранее указанных условиях.

Для большинства элементов пневмо- и гидроавтоматики сохраняемость является второстепенным свойством по сравнению с работоспособностью и ремонтпригодностью.

Функциональные и числовые характеристики надежности элемента

Рассмотрим график функционирования *восстанавливаемого* элемента (рис. 3.1), который выходит из строя через случайные отрезки времени $t_1, t_2, \dots, t_\mu, \dots$, затем его ремонтируют в течение времени $t_1^R, t_2^R, \dots, t_\mu^R, \dots$ и вновь вводят в работу. На рис. 3.1 сплошными линиями изображены отрезки времени работы элемента, называемые *наработками между отказами*, пунктиром — времени восстановления. Совокупность случайных чисел $t_1, t_2, \dots, t_\mu, \dots$ называют *потоком отказов элемента*. Нарботки $t_1, t_2, \dots, t_\mu, \dots$ есть значения случайной величины T — *времени безотказной работы элемента*. Последовательность случайных чисел $t_1^R, t_2^R, \dots, t_\mu^R, \dots$ образует *поток*

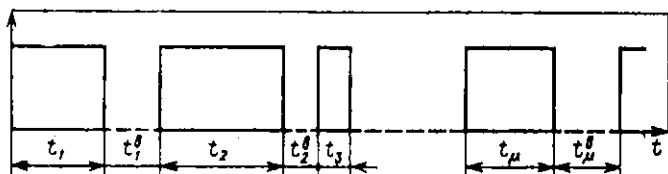


Рис. 3.1. График функционирования восстанавливаемого элемента.

восстановлений, а сами $t_1^a, t_2^a, \dots$ есть значения случайной величины T^a — времени восстановления.

Исходя из опыта изучения надежности элементов наработку между отказами t_μ можно считать независимой от длительности ремонта t_μ^a , что позволяет раздельно изучать закономерности поведения случайных величин T и T^a . Сделанное допущение означает, что после каждого отказа элемент восстанавливается до полностью работоспособного состояния.

Понятия потока отказов и времени безотказной работы легко вводятся и при исследовании надежности *невосстанавливаемых элементов*. Если включить в работу сколь угодно большое число однотипных элементов и фиксировать моменты времени их отказов $t_1, t_2, \dots, t_\mu, \dots$, то последовательность случайных чисел $t_1, t_2, \dots, t_\mu, \dots$, называемых *наработками до первого отказа*, образует поток отказов, а сами наработки есть значения случайной величины T . Понятие потока восстановления в этом случае не имеет смысла.

Основной и наиболее полной характеристикой случайной величины T является *вероятность безотказной работы* $P(t)$. Функция $P(t)$ есть вероятность того, что в определенных условиях работы отказ элемента произойдет не ранее момента времени t , т. е.

$$P(t) = \text{Вер} \{T > t\} \quad (3.2)$$

Из физического смысла надежности следует, что $P(\infty) = \text{Вер} \{T > \infty\} = 0$, т. е. вероятность бесконечно длительной работы элемента равна нулю. При $t=0$ функция $P(0) = \text{Вер} \{T > 0\} = 1$, т. е. считается, что в начальный момент времени элемент находится в исправном состоянии. При возрастании t от 0 до ∞ функция $P(t)$ убывает (рис. 3.2). Отметим, что T -величина положительная, поэтому $P(t)$ и все другие функции, характеризующие ее, существуют только при $t \geq 0$.

В инженерных расчетах используют *частоту безотказной работы* $P^*(t)$ и *вероятность отказа* $Q(t)$ элемента:

$$P^*(t) = N(t)/N \quad (3.3) \quad Q(t) = \text{Вер} \{T < t\} \quad (3.4)$$

Здесь N — общее (достаточно большое) число испытываемых однотипных элементов; $N(t)$ — число элементов, работающих к моменту времени t ; $\lim_{N \rightarrow \infty} P^*(t)$ равен $P(t)$. Функция $Q(t)$ характеризует «ненадежность» элемента, т. е. показывает, каковы шансы дан-

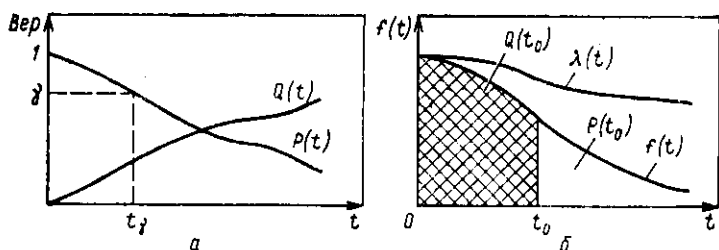


Рис. 3.2. Функциональные характеристики случайной величины T : а — функция распределения безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$; б — плотность вероятности $f(t)$ и интенсивность отказа $\lambda(t)$.

ного элемента выйти из строя раньше момента времени t . Функция $Q(t)=0$ при $t=0$ и стремится к 1 при $t \rightarrow \infty$.

Предполагая, что элемент может находиться только в исправном или неисправном состояниях и учитывая, что события отказа и работоспособности несовместимы и образуют полную группу, получим: $P(t) + Q(t) = 1$. Надежность элемента не всегда удобно характеризовать функцией $P(t)$, так как при малых t значения вероятности безотказной работы близки к единице и мало отличаются друг от друга. Поэтому для описания поведения случайной величины T часто применяют функцию $f(t)$ плотности распределения времени безотказной работы элемента:

$$f(t) = dQ/dt = -dP/dt \quad (3.5)$$

Плотность $f(t)$ всегда положительна, так как $Q(t)$ — неубывающая функция. Зная $f(t)$, нетрудно найти $Q(t)$ и $P(t)$. Для этого проинтегрируем уравнение (3.5). Получим:

$$Q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad P(t) = \int_t^\infty f(\tau) d\tau \quad (3.6)$$

На рис. 3.2,б показана кривая $f(t)$; значение вероятности отказа $Q(t)$ за время работы $t < t_0$ равно площади области с двойной штриховкой.

В инженерных задачах вместо $f(t)$ используют ее статистическую оценку — частоту отказа $f^*(t)$:

$$f(t) = (\Delta N / \Delta t) / N = \Delta N / N \Delta t \quad (3.7)$$

где ΔN — число элементов, вышедших из строя за малый отрезок времени Δt ; N — общее число однотипных элементов, участвующих в опыте. При $N \rightarrow \infty$ и $\Delta t \rightarrow 0$ оценка $f^*(t)$ стремится к $f(t)$.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$. Эта функция, называемая λ -характеристикой, описывается выражением

$$\lambda(t) = f(t)/P(t) \quad (3.8)$$

Она характеризует плотность распределения отказов $f(t)$, отнесенную к надежности элемента $P(t)$ в момент времени t . Другими словами, интенсивность $\lambda(t)$ показывает, какая доля работающих в данный момент времени t элементов откажет за единицу времени после t , в то время как функция $f(t)$ показывает, какая доля общего числа N элементов выйдет из строя за $\Delta t = 1$. Понятно, что $\lambda(0) = f(0)$ и $\lambda(t) > f(t)$ при $t > 0$.

Из приведенного определения $\lambda(t)$ ясен способ вычисления ее статистической оценки:

$$\lambda^*(t) = (\Delta N / \Delta t) / N(t) = \Delta N / N(t) \Delta t \quad (3.9)$$

где $N(t)$ — число работающих к моменту времени t элементов; ΔN — число отказов за отрезок времени Δt . Соотношение (3.9) можно получить и из (3.8), заменив $f(t)$ и $P(t)$ их оценками: $\lambda^*(t) = f^*(t)/P^*(t) = \Delta N / N(t) \Delta t$.

Функции $P(t)$, $f(t)$, $Q(t)$ и $\lambda(t)$ однозначно связаны друг с другом, и если известна одна, можно определить остальные. Рассмотрим все варианты этой задачи.

1. Известна $P(t)$. Тогда

$$Q(t) = 1 - P(t) \quad f(t) = -dP/dt \quad \lambda(t) = f(t)/P(t)$$

2. Задана функция $Q(t)$. Решение легко сводится к предыдущему варианту.

3. Известна $\lambda(t)$. Имеем уравнение

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{dP(t)}{P(t) dt} \quad \text{или} \quad \frac{dP}{P(t)} = -\lambda(t) dt$$

которое можно проинтегрировать. Получим:

$$P(t) = P(0) \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right\} = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right\} \quad (3.10)$$

так как $P(0) = 1$. Зная $P(t)$, вычисляем $Q(t)$ и $f(t)$.

4. Задана плотность $f(t)$. Находим вероятность отказа и безотказной работы:

$$Q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad P(t) = \int_t^\infty f(\tau) d\tau$$

Важнейшей числовой характеристикой случайной ве-

личины T является математическое ожидание времени безотказной работы:

$$M\{T\} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (3.11)$$

Последнее равенство можно получить, если заменить функцию $f(t)$ выражением $-dP/dt$ и проинтегрировать соотношение по частям от 0 до ∞ с учетом того, что $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$.

Математическое ожидание $M\{T\}$ часто называют средним временем безотказной работы, или *наработкой на отказ*, и обозначают t_n . Оценку t_n^* находят по формуле среднего арифметического:

$$t_n^* = M^*\{T\} = \frac{1}{N} \sum_{\mu=1}^N t_{\mu} \quad (3.12)$$

При $N \rightarrow \infty$ оценка сходится по вероятности к $M\{T\}$.

Дисперсию случайной величины находят по обычной формуле, однако ее сравнительно мало применяют при исследовании надежности элементов.

Одной из характеристик надежности элемента является его *γ -процентный ресурс*. Под ресурсом понимают время наработки до какого-либо заранее заданного состояния надежности элемента. В частности, пусть такое заданное состояние характеризуется вероятностью $P(t) = \gamma$, где $0 \leq \gamma \leq 1$. Тогда γ -процентный ресурс элемента равен отрезку времени от нуля до значения t_{γ} , являющегося корнем уравнения $P(t_{\gamma}) = \gamma\%/100$, где $\gamma\%$ задается в интервале $[0, 100\%]$. Это уравнение легко решается графически (рис. 3.2, а).

Достаточно часто надежность элементов пневмо- и гидроавтоматики характеризуют *вероятностью безотказной работы за заранее заданное время t_0* , т. е. величиной $P(t_0)$, где t_0 обычно равно 2000 ч. В качестве оценки этой числовой характеристики используют значение

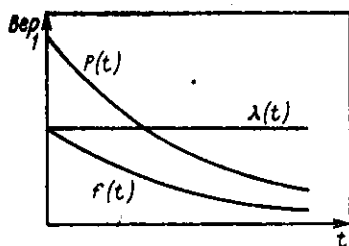
$$P^*(t_0) = N(t_0)/N \quad (3.12a)$$

где $N(t_0)$ — число элементов, работающих к моменту времени t_0 .

Рассмотрим вид и свойства основных функциональных характеристик, наиболее часто встречающихся при исследовании надежности элементов.

Экспоненциальное распределение имеет место, когда

Рис. 3.3. Экспоненциальное распределение.



интенсивность отказов $\lambda(t)$ не меняется во времени, т. е. $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$. Тогда из уравнений (3.5) и (3.10) получаем:

$$P(t) = \exp\{-\lambda t\} \quad f(t) = \lambda \exp\{-\lambda t\}$$

Математическое ожидание $M\{T\}$ равно

$$M\{T\} = \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda}$$

Законы распределения $P(t)$ и $f(t)$ зависят только от $M\{T\}$, поэтому знание дисперсии не требуется. Функциональные характеристики экспоненциально распределенной случайной величины T показаны на рис. 3.3.

Практика исследования надежности элементов систем автоматического управления (особенно электронных и радиотехнических устройств) показала, что на определенных этапах их «жизни» частоты внезапных отказов удовлетворительно аппроксимируются зависимостью $\lambda \exp\{-\lambda t\}$. Кроме того, экспоненциальный закон очень удобен для проведения численных расчетов. В частности, при малых значениях $\lambda(t)$ функцию $\exp\{-\lambda t\}$ можно разложить в ряд по степеням λt в окрестности точки $\lambda t = 0$. Тогда при $\lambda t \ll 1$ имеем приближенные соотношения $P(t) \approx 1 - \lambda t$ и $Q(t) \approx \lambda t$, которые можно использовать для грубой оценки надежности или ненадежности элементов на начальном участке их работы.

Если известна наработка на отказ t_n , то приближенно можно оценить вероятность безотказной работы $P(t)$ для ряда интервалов времени:

Время работы t	t_n	$0,1t_n$	$0,01t_n$	$0,001t_n$	$0,0001t_n$
Вероятность $P(t)$	0,37	0,9	0,99	0,999	0,9999

Согласно этим данным, из 1000 однотипных элементов к моменту времени $t = t_n$ в работоспособном состоянии останется ~ 370 , к моменту $t = 0,1 t_n$ будет работать ~ 900 элементов, при $t = 0,01 t_n$ в работе будет находиться ~ 990 элементов, и т. д.

Задачу можно поставить и иначе: найти приближен-

ный γ -процентный ресурс работы элемента, если задана γ , равная $P(t_\gamma) = 0,37; 0,9; 0,99; 0,999$ и т. д. Из приведенных данных следует ответ и на этот вопрос, только t_γ выражается в долях от t_{11} .

Заметим, что увеличение вероятности на одну «девятку» связано с очень большим объемом дополнительных исследовательских и проектных работ по совершенствованию элемента, а также со значительными затратами на повышение культуры эксплуатации. При автоматизации промышленных объектов используют элементы, для которых γ -процентная вероятность изменяется от 90 до 99%, т. е. время их эксплуатации t_γ составляет $(0,1-0,01) t_{11}$.

Распределение Вейбулла. Характеристики этого распределения описываются уравнениями

$$P(t) = \exp \{-t^m/t_0\} \quad f(t) = m t^{m-1} \exp \{-t^m/t_0\}/t_0 \\ \lambda(t) = m t^{m-1}/t_0 \quad M\{T\} = t_0^{1/m} \Gamma(1 + 1/m) \quad (3.13)$$

где $0,4 \leq m \leq 2,5$; t_0 — постоянный параметр; $\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt$ — гамма-функция, значения которой можно найти в справочной литературе. В частном случае, при $m=1$, имеем экспоненциальное распределение. Графики $P(t)$, $f(t)$ и $\lambda(t)$ при $m=0,5$ и 2 показаны на рис. 3.4.

Распределение Вейбулла часто применяют при исследовании надежности аппаратуры, состоящей из большого числа однотипных элементов. Его используют шире, чем экспоненциальное распределение. Объясняется это тем, что функция распределения Вейбулла зависит от двух параметров — m и t_0 . Кроме того, если

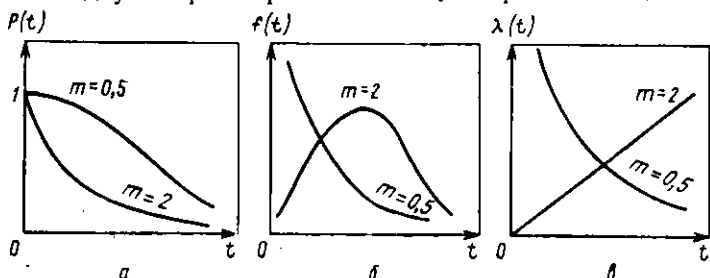
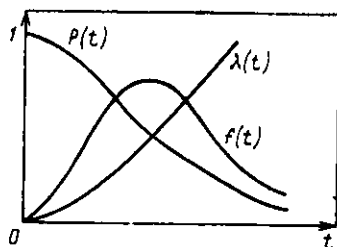


Рис. 3.4. Распределение Вейбулла:

а — функции $P(t)$; б — плотности $f(t)$; в — интенсивности отказов $\lambda(t)$.

Рис. 3.5. Усеченное нормальное распределение.



$T = \min \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, где случайные величины $t_1, t_2, \dots, t_n$ имеют одинаковое распределение, то поведение T подчиняется распределению Вейбулла. В дальнейшем

будет показано, что в системах, не имеющих резервных элементов, время безотказной работы $T = \min \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, где $T_1, T_2, \dots, T_n$ — случайные величины времени безотказной работы каждого из n элементов.

Усеченное нормальное распределение. Функция распределения нормальной величины T имеет вид:

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp \{-z^2/2\} dz \Big/ \frac{1}{2\pi} \int_{-t_n/\sigma}^{\infty} \exp \{-z^2/2\} dz \quad (3.14)$$

где $z = (t - t_n)/\sigma$; t_n — наработка на отказ; σ — среднее квадратическое отклонение. Термин «усеченное» означает ограниченность диапазона изменения аргумента t , $0 \leq t \leq \infty$. В большинстве случаев $(t_n/\sigma) > 2$, тогда знаменатель в последней формуле оказывается близким к единице, т. е.

$$P(t) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp \{-z^2/2\} dz \quad (3.15)$$

Функция $f(t)$ и $\lambda(t)$ для нормально распределенной случайной величины T достаточно громоздки и мало удобны для применения в инженерных расчетах. Усеченный нормальный закон применяют при исследовании постепенных отказов, обусловленных усталостью или физическим износом элементов. Зависимости $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ показаны на рис. 3.5.

Определение оценок характеристик надежности элементов

Оценки характеристик надежности средств пневмо- и гидроавтоматики определяют по результатам лабораторных испытаний или обработкой данных об отказах элементов в процессе их эксплуатации в заводских условиях.

Для построения законов распределения невосстанавливаемых или недорогих восстанавливаемых элементов ставится лабораторный эксперимент, заключающийся в следующем. Берут N однотипных элементов и включают в работу. Обычно $N > 50-100$ (чем дешевле элемент, тем большее число их испытывается). Регистрируют моменты времени отказа элементов t_{μ} . Эксперимент считается законченным, когда выйдут из строя $\sim 95\%$ элементов от общего числа N .

Обозначим продолжительность эксперимента t_m . Разобьем отрезок $[0, t_m]$ на k интервалов примерной длины $\Delta t \approx t_m / (1 + 3,31 \lg N)$ и подсчитаем число отказов ΔN_q , имевших место на каждом q -том интервале времени ($q = 1, 2, \dots, k$). Тогда, используя формулы (3.3), (3.7), (3.9), получим:

$$P^*(q\Delta t) = 1 - \sum_{\beta=1}^q \Delta N_{\beta} / N \quad f^*(q\Delta t) = \Delta N_q / \Delta t N \quad (3.16)$$

$$\lambda^*(q\Delta t) = \Delta N_q / \Delta t \left(N - \sum_{\beta=1}^q \Delta N_{\beta} \right)$$

В зависимостях (3.16) функции P^* , f^* и λ^* вычисляются в центрах каждого интервала Δt , причем условно полагается, что ΔN_q отказов равномерно распределено по отрезку Δt .

Далее строят график частот отказов $f^*(q\Delta t)$ или $P^*(q\Delta t)$, выдвигают и проверяют гипотезу о законе распределения случайной величины T . Выбор вида закона $P(t)$ или $f(t)$ представляет большие трудности и основан на накопленном опыте исследования надежности сходных элементов. Большую помощь при выборе теоретических законов может оказать анализ графика экспериментальной функции интенсивности отказов $\lambda^*(q\Delta t)$. Часто график λ^* имеет вид, показанный на рис. 3.6.

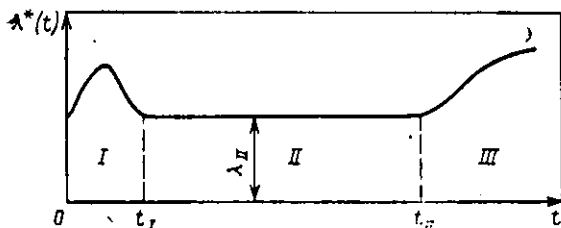


Рис. 3.6. Экспериментальная λ -характеристика элемента (I, II, III — периоды приработки, «зрелости» и «старости»).

Область определения $\lambda^*(t)$ можно условно разделить на три характерных интервала.

На первом интервале обычно наблюдается некоторый подъем и последующий спад кривой $\lambda^*(t)$. Этот период называют *приработкой элемента*, или *«детством»*. Повышенное число отказов на отрезке $[0, t_I]$ объясняется тем, что среди N испытуемых элементов имеется некоторое число дефектных, быстро выходящих из строя. В общем случае длительность первого интервала определяется культурой производства элементов, качеством работы заводского отдела технического контроля.

На втором интервале интенсивность отказов практически постоянна — наступает *период «зрелости» элемента*. На отрезке $[t_I, t_{II}]$ все дефектные элементы вышли из строя, а исправные еще не успели износиться. Этот период времени обычно длится больше, чем период приработки.

На третьем интервале начинается физический износ элемента или отдельных его деталей; число исправных элементов сокращается, поэтому $\lambda^*(t)$ быстро возрастает — наступает *период «старости»*. Поток отказов на отрезке времени $[t_I, t_{II}]$ можно считать *простейшим*, т. е. обладающим свойствами *стационарности*, *ординарности* и *отсутствия последействия*. Стационарность проявляется в том, что закон распределения числа отказов не зависит от начала отсчета времени, а интенсивность отказов постоянна. Ординарность потока означает практическую невозможность одновременного появления двух отказов. Наконец, в потоке без последействия закон распределения числа отказов на любом отрезке времени не зависит от числа отказов элемента до и после этого отрезка. Последействие обусловлено, как правило, изменениями во времени условий эксплуатации элементов и не оказывает существенного влияния на свойства потока отказов средств пневмо- и гидроавтоматики. Отметим, что в простейшем потоке наработки между отказами подчинены экспоненциальному закону распределения $P(t) = \exp\{-\lambda_{II}t\}$, а число отказов l на отрезке времени δt распределено по закону Пуассона:

$$P_l = (\lambda_{II}\delta t)^l \exp\{-\lambda_{II}\delta t\}/l!, \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Оценку параметра λ_{II} для простейшего потока находят как среднее арифметическое от значений $\lambda^*(q\Delta t)$, принадлежащих интервалу времени $[t_I, t_{II}]$.

Вероятность безотказной работы элемента на первом и втором интервалах может быть аппроксимирована суперпозицией двух экспоненциальных зависимостей:

$$P(t) = C_I \exp\{-\lambda_I t\} + C_{II} \exp\{-\lambda_{II} t\} \quad (3.17)$$

где $\lambda_I \neq \lambda_{II}$. Предположим что $\lambda_I > \lambda_{II}$. При больших значениях времени ($t > t_I$) первый член выражения (3.17) мал по сравнению со вторым (так как при $t \rightarrow \infty$ $\exp\{-\lambda_I t\}$ быстрее стремится к нулю, чем $\exp\{-\lambda_{II} t\}$), и $\lambda(t) \approx \lambda_{II}$. При $t < t_I$ надо учитывать оба члена, и интенсивность отказов на первом интервале определяется формулой

$$\lambda(t) = \frac{C_I \lambda_I \exp\{-\lambda_I t\} + C_{II} \lambda_{II} \exp\{-\lambda_{II} t\}}{C_I \exp\{-\lambda_I t\} + C_{II} \exp\{-\lambda_{II} t\}}$$

Функции $P(t)$ и $\lambda(t)$ на третьем интервале времени часто аппроксимируются усеченным нормальным законом распределения. В некоторых случаях причинами выхода из строя элементов на третьем интервале являются внезапные и постепенные, обусловленные старением (физическим износом), отказы. Оба вида отказов независимы. Предположим, что внезапные отказы подчиняются экспоненциальному распределению, а отказы в результате износов — нормальному с $(t_{II}/\sigma) > 2$. Тогда вероятность $P(t)$ того, что за время t не будет отказа, такова:

$$P(t) = \exp\{-\lambda t\} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\{-z^2/2\} dz$$

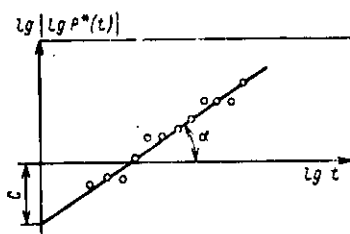
Для описания экспериментальных частот достаточно часто применяют и распределение Вейбулла (3.13). Параметры m и t_0 этого распределения можно находить по графикам частот P^* .

Прологарифмируем дважды выражение $P(t) = \exp\{t^m/t_0\}$. Получим уравнение прямой линии: $\lg|\lg P(t)| = m \lg t - \lg t_0 - 0,362$.

Нанесем экспериментальные значения $P^*(q\Delta t)$ на график с осями $\lg t$ (ось абсцисс) и $\lg|\lg P|$ (ось ординат). Проведем через эти точки каким-либо способом прямую линию (рис. 3.7). Коэффициент m равен тангенсу угла наклона α этой прямой к оси $\lg t$, а значение t_0 находят из соотношения $\lg t_0 = C - 0,362$ (напомним, что $P(t) < 1$ и $\lg P(t) < 0$).

При существенном отклонении экспериментальных точек от прямой применение распределения Вейбулла становится невозможным.

Рис. 3.7. Определение параметров распределения Вейбулла.



Полученные зависимости $P^*(t)$, $\bar{f}^*(t)$, $\lambda^*(t)$ характеризуют надежность работы элемента только в тех условиях эксплуатации, в которых проводился эксперимент. Однако на практике возможны самые разнообразные условия эксплуатации элементов на установках с различным уровнем вибраций, при воздействии агрессивных сред (паров кислот, щелочей и т. п.). Поэтому возникает задача проведения описанных экспериментов в различных условиях работы элементов. Это, несомненно, увеличивает затраты времени на исследование надежности.

Приближенный способ учета изменяющихся условий эксплуатации элемента заключается во введении поправочных множителей k_n при определении интенсивностей отказов $\lambda(t)$. Обозначим найденную в лабораторных условиях (т. е. при нормальных температуре, влажности, давлении, вибрациях и т. п.) лямбда — характеристику элемента $\lambda_0(t)$. Интенсивность отказов этого элемента при работе его в других условиях находят по формуле $\lambda(t) = k_n \lambda_0(t)$, где k_n — коэффициент, учитывающий отличие условий работы от лабораторных. Этот коэффициент изменяется от 1 до ~ 1000 . В частности, $k_n = 10-20$ при использовании элемента на заводе; $30-70$ — при установке его на корабле, автомобиле, железнодорожном транспорте; $90-100$ — при эксплуатации элемента в высокогорных районах; $160-200$ — при установке его на самолете. Точность экстраполяции статистических характеристик надежности элемента с помощью коэффициентов k_n невысока, поскольку сами коэффициенты k_n часто определяют на основе малого числа экспериментальных данных или по методу экспертных оценок.

К введению поправочных множителей прибегают и при ускоренных испытаниях элементов в лабораторных условиях. В этом случае с целью заметного уменьшения времени t_m элементы испытывают в условиях, заведомо более трудных, чем предполагаемые условия эксплуатации. Множители k_n в таких ситуациях оказываются меньше единицы.

Для определения функций $f(t)$, $P(t)$ и $\lambda(t)$ не обязательно проводить лабораторные исследования. Можно собрать сведения о наработках t_{μ} одного или нескольких однотипных элементов (в том числе и элементов многократного действия), находящихся в примерно одинаковых условиях эксплуатации.

Информация об отказах и длительности ремонтов элементов обычно содержится в заводских журналах эксплуатации и ведомостях. Обработка значений t_{μ} осуществляется рассмотренным выше способом. Следует отметить, что экспериментальная функция $\lambda^*(t)$ в этом случае обычно не имеет явных «горбов» при малых и больших значениях t . Объясняется это тем, что в журналах не регистрируют отказы элементов или систем, находящихся в наладке и пробной эксплуатации. Кроме того, многие элементы подвергают предварительной «приработке» в лабораторных условиях при $0 \leq t \leq t_{II}$ и сдают в эксплуатацию после стабилизации интенсивности отказов.

В эксплуатационных журналах содержится очень мало сведений об отказах элементов, вызванных их износом в период $t > t_{II}$. Обычно заводские работники, используя многолетний опыт работы, не допускают эксплуатации элемента вплоть до его износа. Существует целая система мероприятий (профилактические осмотры, текущие и капитальные ремонты, расследование случаев выхода из строя и аварий), позволяющих вести тщательный контроль за состоянием оборудования и заменять его новым, не дожидаясь начала третьего периода.

Полученные экспериментальные данные об отказах элементов используют не только для определения функциональных показателей надежности, но и для вычисления оценок t_n^* , λ^* , $P(t_0)$ числовых характеристик по формулам (3.12), (3.12а). Эти оценки являются точечными и не характеризуют погрешностей их определения для конечного числа N опытных данных. Для учета точности и достоверности точечных оценок вводят в рассмотрение нижние $(t_{nn}, \lambda_n, P(t_0)_n)$ и верхние $(t_{nv}, \lambda_v, P(t_0)_v)$ доверительные границы. Эти величины находят из условий

$$\begin{aligned} \text{Вер} \{t_{nn} < t_n < t_{nv}\} &= P_g & \text{Вер} \{\lambda_n < \lambda < \lambda_v\} &= P_g \\ \text{Вер} \{P(t_0)_n < P(t_0) < P(t_0)_v\} &= P_g \end{aligned}$$

где P_g — доверительная вероятность того, что отрезки

$(t_{нн}, t_{нв}), (\lambda_{нв}, \lambda_{в}), (P(t_0)_{н}, P(t_0)_{в})$ накроют истинные значения $t_{н}, \lambda, P(t_0)$.

При исследовании надежности средств пневмо- и гидроавтоматики обычно принимают $P_g = 0,8$ или $0,9$. Если заданы законы распределения оценок $t_{н}^*, \lambda^*$ и $P^*(t_0)$, то в соответствующих таблицах распределений нетрудно найти граничные значения доверительных интервалов, которые затем используют в «пессимистических» ($t_{нн}, \lambda_{в}, P(t_0)_{н}$) и «оптимистических» ($t_{нв}, \lambda_{н}, P(t_0)_{в}$) расчетах надежности систем.

3.2. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ

Система состоит из нескольких соединенных определенным образом элементов. Система характеризуется некоторыми показателями $y_1, y_2, \dots, y_n$ и считается работоспособной, если справедливы все неравенства типа (3.1); под отказом системы понимают случайное событие, заключающееся в нарушении хотя бы одного из неравенств (3.1). Системы, для которых можно ввести подобные определения работоспособности и отказа, назовем *простыми*. Существует достаточно обширный класс систем, называемых сложными (см. раздел 3.4), для которых не удастся дать четкого определения отказа, и понятие надежность заменяют эффективностью.

Простая система может находиться в состоянии работоспособности или отказа. При этом отказ системы всегда обусловлен выходом из строя того или иного элемента, однако отказ конкретного элемента не всегда приводит к выходу системы из строя. Элемент называют *основным*, если выход его из строя приводит к отказу всей системы. Помимо основных, в систему могут входить *резервные или избыточные* элементы, выход которых из строя не влечет за собой отказа системы. Про систему, содержащую резервные элементы, говорят, что она обладает *избыточностью*. Например, система из двух параллельно включенных предохранителей обладает некоторой избыточностью, ибо перегорание одного предохранителя не приводит к исчезновению тока в электрической цепи. При последовательном соединении предохранителей система не имеет избыточности, оба элемента являются основными, поскольку перегорание каждого из них приводит к отказу системы — исчезновению тока в цепи.

Определим вероятность безотказной работы $P(t)$ системы, состоящей из n основных элементов с соответству-

ющими функциями распределения $P_j(t)$, $j=1, 2, \dots, n$. Эта задача сводится к нахождению вероятности произведения случайных событий.

Пусть работоспособность системы при $T > t$ есть случайное событие C , исправность каждого j -го элемента — событие A_j ($j=1, 2, \dots, n$). Событие C может произойти, если произойдут события $A_1, A_2, \dots, A_n$. Вероятность события C равна произведению вероятностей $P_j(t)$ независимых событий A_j :

$$P(t) = \prod_{j=1}^n P_j(t) \quad (3.18)$$

С учетом уравнения (3.10) получим:

$$P(t) = \prod_{j=1}^n \exp \left\{ - \int_0^t \lambda_j(\tau) d\tau \right\} = \exp \left\{ - \int_0^t \Lambda(\tau) d\tau \right\} \quad (3.19)$$

где $\Lambda(t)$ — интенсивность отказов системы

$$\Lambda(t) = \sum_{j=1}^n \lambda_j(t).$$

Обозначим наработку до первого отказа j -го основного элемента системы через t_j . Тогда наработку до первого отказа всей системы t_c можно определить как наименьшее из значений t_j :

$$t_c = \min \{t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_n\} \quad (3.20)$$

Математическое ожидание времени безотказной работы системы $M\{T\}$, или наработку на отказ $t_{н.с.}$, находят по обычной формуле:

$$M\{T\} = t_{н.с.} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \exp \left\{ - \int_0^t \Lambda(\tau) d\tau \right\} dt$$

Для случая, когда $P_j(t) = \exp \{-\lambda_j t\}$, получаем

$\Lambda = \sum_{j=1}^n \lambda_j$, а математическое ожидание оказывается равным

$$M\{T\} = t_{н.с.} = 1/\Lambda = 1 / \sum_{j=1}^n \lambda_j \quad (3.21)$$

В частности, если все элементы имеют одинаковую интенсивность отказов λ , то $t_{н.с.} = 1/n\lambda = t_n/n$, где $t_n = 1/\lambda$ — наработка на отказ одного элемента.

Из последнего выражения следует важный для практики вывод, что наработка на отказ системы, состоящей из n основных элементов с одинаковыми интенсивностями отказов, снижается в n раз. Для того, чтобы надежность системы не уменьшалась существенно с ростом n , необходимо при ее построении применять более надежные элементы (с меньшими интенсивностями λ). Например, задан γ -процентный ресурс работы системы, равный 90%, т. е. $P(t_\gamma) = 0,9$. Такую надежность можно получить, построив систему из 100 элементов с $P_j(t_\gamma) = 0,999$ или из 1000 элементов с $P_j(t_\gamma) = 0,9999$. Напомним, что увеличение надежности элемента на одну «девятку» означает его удорожание примерно на порядок. Поэтому стоимость системы из 1000 элементов примерно на два порядка выше стоимости системы из 100 менее надежных элементов.

Системы, состоящие только из основных элементов, т. е. не обладающие избыточностью, широко применяют при автоматизации промышленных объектов и, в частности, при создании локальных АСР. Во введении описывалась структурная схема такой АСР (см. рис. В.1), все элементы которой — основные. В этом случае вероятность безотказной работы системы находят по формуле

$$P(t) = \prod_{j=1}^{10} P_j(t) = \prod_{j=1}^{10} \exp\{-\lambda_j t\} = \exp\left\{-\sum_{j=1}^{10} \lambda_j t\right\}$$

где $\lambda_j = \text{const}$ — интенсивности отказов отдельных элементов.

Основные элементы чаще всего включаются последовательно, однако могут входить в систему и в форме параллельных соединений. Примером служит структурная схема ПИ-регулятора, состоящего из двух параллельно работающих элементов — интегратора и усилителя. Выход из строя любого из этих элементов приводит к отказу системы.

Для повышения надежности системы в нее помимо основных вводят и резервные элементы. Различают «горячий» и «холодный» резерв. Элементы, находящиеся в «горячем» резерве, всегда включены в работу; элементы из «холодного» резерва вводятся в действие при отказе основных.

На рис. 3.8, а изображена система с «горячим» резервом. Компрессоры 1 и 2 подают сжатый воздух в коллек-

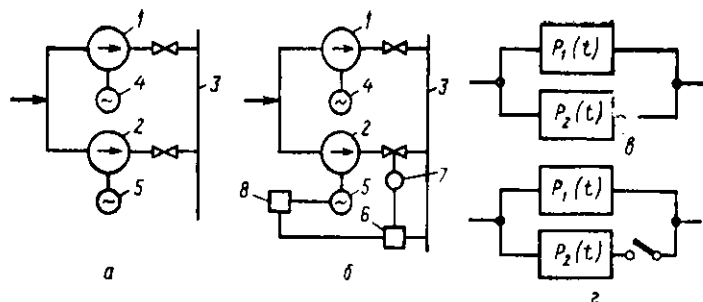


Рис. 3.8. Принципиальная и структурная схемы систем с «горячим» (а, в) и с «холодным» (б, г) резервом:

1, 2 — компрессоры; 3 — коллектор; 4, 5 — электродвигатели; 6 — контактный манометр; 7 — электропривод задвижки; 8 — магнитный пускатель электродвигателя; 9 — ключ.

тор 3; они приводятся в действие электродвигателями 4 и 5. Система с «холодным» резервом, показанная на рис. 3.8, б, функционирует следующим образом. Компрессор 1 работает непрерывно. Если давление в коллекторе 3 станет меньше некоторого заданного значения, контактный манометр 6 включит электропривод 7 на открытие запорной задвижки и подаст сигнал на включение в работу электродвигателя 5 резервного компрессора 2. При давлении воздуха выше заданного значения компрессор 2 отключается. Описанную схему «холодного» резервирования применяют, например, в устройствах подготовки сжатого воздуха для питания средств пневмоавтоматики (см. Приложение 2).

На рис. 3.8, в, г показаны структурные схемы систем с «горячим» и «холодным» резервом. Последняя система должна содержать ключ 9, включающий в работу резервный элемент, и контрольное устройство для определения момента отказа основного элемента. Вероятность безотказной работы $P(t)$ системы с «холодным» резервом зависит, следовательно, не только от характеристик $P_j(t)$ элементов, но и от функций распределения времени безотказной работы ключа $P_k(t)$ и контрольного устройства $P_{к-у}(t)$, что несколько усложняет оценку надежности системы.

Системы с «горячим» резервом обычно строятся из параллельно включенных элементов, очень редко — из последовательно соединенных. Определим вероятность безотказной работы $P(t)$ системы, состоящей из n параллельно включенных резервных элементов, выполняю-

щих одинаковое назначение и обладающих функциями распределения $P_j(t)$. Система перестанет работать, если все элементы выйдут из строя. Случайное событие — отказ системы — есть произведение случайных событий — отказов отдельных элементов. Поэтому функцию ненадежности $Q(t) = \text{Вер}\{T < t\}$ вычисляют по формуле

$$Q(t) = 1 - \prod_{j=1}^n Q_j(t)$$

где $Q_j(t) = 1 - P_j(t)$ — вероятность отказа j -го элемента при $T < t$. Функцию вероятности безотказной работы системы $P(t)$ легко вычислить через $Q(t)$:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{j=1}^n Q_j(t) = 1 - \prod_{j=1}^n [1 - P_j(t)] \quad (3.22)$$

Для частного случая, когда $P_j(t) = \exp\{-\lambda t\}$, получим:

$$P(t) = 1 - [1 - P_j(t)]^n = 1 - [1 - e^{-\lambda t}]^n$$

Разложив экспоненту в ряд Тейлора в точке $\lambda t = 0$ и оставляя только первый член, при малых λt имеем: $P(t) \approx 1 - (\lambda t)^n$. Для иллюстрации влияния числа n резервных элементов на надежность системы приведем значения $P(t)$, вычисленные по этой формуле:

n	$\lambda t = 0,01$	$\lambda t = 0,1$	$\lambda t = 0,2$
1	0,99	0,9	0,8
2	0,9999	0,99	0,96
3	0,999999	0,999	0,99

Из анализа приведенных данных следует, что введение одного резервного элемента повышает вероятность $P(t)$ на две или одну «девятку» (для $\lambda t = 0,01$ и $0,1$). Другими словами, «горячее» резервирование позволяет существенно повысить вероятность безотказной работы системы, т. е. появляется возможность строить надежно функционирующие схемы из малонадежных элементов. Это свойство схем с резервированием отчетливо проявляется и при определении времени наработки на отказ всей системы:

$$t_{н.с} = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda t})^n] dt = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right)$$

Здесь принято что надежность всех элементов описывается функцией $P_j(t) = \exp\{-\lambda t\}$. При $n=2$ значение $t_{н.с}$ увеличивается в 1,5 раза по сравнению с $t_n = 1/\lambda$, при $n=3$ — примерно в 2 раза, и т. д.

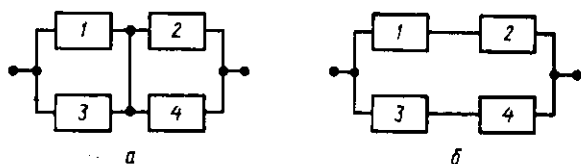


Рис. 3.9. Схемы резервирования элемента (а) и цепочки элементов (б).

Определим наработку до первого отказа t_c системы с «горячим» резервом. Система откажет тогда, когда откажут все n элементов, т. е. $t_c = \max\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$. Сравнивая это соотношение с выражением (3.20), еще раз отмечаем преимущество системы с резервированием.

Во многих случаях система состоит не из одного основного и n резервных элементов, а из нескольких основных элементов, включенных, например, последовательно. Для повышения надежности в эту систему надо вводить резервные элементы. Это можно сделать несколькими способами: резервировать каждый основной элемент индивидуально, резервировать всю цепочку основных элементов и т. п. Возникает весьма важный для практики вопрос, какая из схем резервирования, содержащих одинаковое число резервных элементов, обеспечит наибольшую вероятность безотказной работы системы.

Решение этой задачи рассмотрим на примере резервирования системы, состоящей из двух последовательно включенных основных элементов. Возможны два варианта резервирования — индивидуальное (рис. 3.9, а) и всей системы (рис. 3.9, б). Обозначим наработки до первого отказа каждого из четырех элементов через t_1 — t_4 , а наработки до первого отказа для систем на рис. 3.9, а и б — соответственно через t_{ca} и t_{cb} . Величины t_{ca} и t_{cb} определяются соотношениями

$$t_{ca} = \min \{ \max (t_1, t_3), \max (t_2, t_4) \}$$

$$t_{cb} = \max \{ \min (t_1, t_2), \min (t_3, t_4) \}$$

Но $t_{cb} \leq \max (t_1, t_3)$, а $t_{cb} \leq \max (t_2, t_4)$, поэтому $t_{cb} \leq \min \{ \max (t_1, t_3), \max (t_2, t_4) \} = t_{ca}$.

Таким образом, наработка до первого отказа для системы с индивидуальным резервированием больше, чем для системы с резервированием всей цепочки элементов. Этот вывод можно подкрепить следующими качественными рассуждениями. Система, показанная на рис. 3.9, б,

откажет, если выйдет из строя по одному элементу из основной и резервной цепочек. Для выхода из строя системы с индивидуальным резервированием требуется выполнение более жесткого условия — отказов элементов 1 и 3 или 2 и 4.

Рассуждая аналогично и проводя выкладки для произвольной системы, получим следующий вывод: чем больше элементов системы резервируется, тем ниже надежность всей системы (при неизменном числе резервных элементов).

«Горячее» резервирование почти не применяют при построении АСР и — тем более — при конструировании средств пневмо- и гидроавтоматики. Включение избыточных элементов удорожает систему и усложняет ее эксплуатацию. Кроме того, большинство отказов основных элементов АСР таково (разрыв импульсной трубки, заклинивание регулирующего органа, засорение сопла в усилителе давления регулятора и т. д.), что резервирование становится затруднительным. Однако при создании достаточно сложных пневматических систем управления (см. главу 4) иногда осуществляют «горячее», а чаще «холодное» резервирование некоторых функций (контроля, сигнализации, регистрации и т. п.). «Холодное» резервирование широко применяют при построении схем технологической сигнализации, аварийной автоматической сигнализации и блокировки, резервирования источников электрического и пневматического питания устройств автоматики и т. д.

Надежность схем с «холодным» резервом в общем случае выше, чем с «горячим» (без учета вероятностей отказов ключей и контрольных устройств), так как находящийся в «холодном» резерве элемент не изнашивается.

3.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ

Восстанавливаемые элементы и системы после каждого отказа ремонтируют. Время восстановления (ремонта) $t_{\text{в}}$ — это значение случайной величины $T^{\text{в}}$, характеристики которой зависят от параметров надежности и ремонтпригодности устройства, квалификации ремонтного персонала, организации труда и многих других факторов.

Случайная величина $T^{\text{в}}$ имеет обычные функциональные и числовые характеристики: законы распределения

$P(t^B) = \text{Вер}\{T^B < t^B\}$, $Q(t^B)$, $f(t^B)$, интенсивность восстановления $\mu(t^B)$, математическое ожидание времени восстановления $M\{T^B\} = t_c^B$.

Среднее время восстановления t_c^B характеризует ремонтпригодность системы и тесно связано с надежностью всех входящих в нее элементов. Действительно, пусть система состоит из n основных элементов, которые характеризуются наработкой на отказ t_{nj} и средним временем восстановления t_{cj}^B ($j=1, 2, \dots, n$). Найдем интенсивность отказов системы Λ , предполагая, что все потоки отказов простейшие: $\Lambda = \sum_{j=1}^n \lambda_j = \sum_{j=1}^n 1/t_{nj} = 1/t_{n.c}$

(где $t_{n.c} = 1/\Lambda$ — наработка на отказ системы). Вероятность отказа системы по «вине» j -го элемента Q_j пропорциональна величине λ_j/Λ , т. е. $Q_j = \lambda_j/\Lambda$. Далее по формуле математического ожидания дискретной случайной величины нетрудно получить

$$t_c^B = \sum_{j=1}^n Q_j t_{cj}^B, \text{ или } t_c^B = \sum_{j=1}^n \lambda_j t_{cj}^B / \Lambda = t_{n.c} \sum_{j=1}^n t_{cj}^B / t_{nj} \quad (3.23)$$

Итак, среднее время восстановления системы зависит от времени ремонта каждого элемента и интенсивности его отказов. Из анализа формулы (3.23) нетрудно сделать вывод, что наиболее ненадежные элементы (с большими λ_j) надо монтировать в системе так, чтобы ремонт их продолжался минимально возможное время.

Специфической числовой характеристикой восстанавливаемой системы является коэффициент готовности:

$$K_r = M\{T\} / (M\{T\} + M\{T^B\}) = t_{n.c} / (t_{n.c} + t_c^B) \quad (3.24)$$

Он равен вероятности того, что в произвольный момент времени t система работоспособна, т. е. не находится в ремонте. Коэффициент готовности изменяется от 0 до 1. В последнем случае $t_c^B = 0$, т. е. ремонт осуществляется мгновенно.

Оценку коэффициента готовности K^* можно вычислить, определив суммарное время работы t_p системы и суммарное время ее восстановления t_B за достаточно большой промежуток наблюдения: $K_r^* = t_p / (t_p + t_B)$. При увеличении времени наблюдения за системой оценка K_r^* сходится по вероятности к K_r . Для простейших потоков отказов и восстановлений с параметрами $\Lambda =$

$= 1/t_{н.с}$ и $\mu_b = 1/t_c^B$ коэффициент готовности выражается через интенсивности: $K_r = \mu_b / (\mu_b + \Lambda)$.

Приведенные формулы для расчета K_r позволяют определять вероятность работоспособного состояния системы для установившихся простейших потоков. В общем случае в некоторый момент времени t система может быть с вероятностью $P_1(t)$ работоспособной и с вероятностью $P_2(t) = 1 - P_1(t)$ — находиться в ремонте. Вероятность P_1 есть решение линейного уравнения

$$dP_1/dt = -\Lambda P_1(t) + \mu_b P_2(t) = \mu_b - P_1(t)(\Lambda + \mu_b)$$

с начальным условием $P_1(0) = 1$. Это решение можно записать в виде $P_1(t) = K_r + (1 - K_r) \exp(-t/t_c^B - t/t_{н.с})$. Из анализа этого выражения следует, что с ростом t вероятность $P_1(t)$ монотонно убывает от 1 до K_r . При введении в систему «горячего» резерва наработка на отказ $t_{н.с}$ увеличивается и $P_1(t)$ убывает намного медленнее. Однако из-за увеличения числа элементов в системе могут возрасти затраты времени на ремонт, значение t_c^B также увеличится, что приведет к ускорению убывания $P_1(t)$. Очевидно, существует оптимальное соотношение между числом резервных элементов, их надежностью и ремонтпригодностью системы, при котором функция $P_1(t)$ наиболее медленно убывает от 1 до K_r , т. е. режим функционирования системы наиболее благоприятен (в смысле вероятности работоспособного состояния ее).

3.4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Технические, организационно-технические и другие типы систем подразделяют условно на *простые* и *сложные*. Признаком классификации обычно служит уровень организации взаимосвязей элементов системы, который не всегда поддается количественной оценке. Поэтому к *сложным* относят системы с большим числом элементов, для которых характерны большая избыточность, изменение структуры в процессе работы, выполнение нескольких разнородных функций, наличие так называемых активных элементов с собственными критериями качества и т. п. С позиции теории надежности одно из существенных особенностей сложной системы состоит в том, что выход из строя некоторых ее элементов не вызывает отказа системы, а приводит лишь к изменению качества выполнения тех или иных функций. Это затрудняет, а за-

частую делает невозможным, введение объективных понятий отказа и работоспособности сложной системы.

Типичным примером сложной системы служит любая АСУТП на базе управляющей ЭВМ или агрегатно-функциональных пневматических комплексов типа «Центр», «Режим» (см. гл. 4). В состав таких систем входят сотни разнородных элементов: датчики, преобразователи, регуляторы, приборы, управляющие ЭВМ, исполнительные механизмы, управленческий персонал и т. п. На подобные системы возлагаются различные функции контроля, сигнализации, регулирования, оптимизации, переключения оборудования и т. п. Естественно, что в процессе функционирования рассматриваемых систем достаточно часто возникают отказы отдельных элементов, вследствие чего снижается качество выполнения или вовсе прекращается выполнение некоторых функций, что, конечно, не означает полного отказа всей системы.

Каждая сложная система предназначена для осуществления той или иной цели. Способность сложной системы выполнять свое целевое назначение (т. е. m заданных функций) в процессе функционирования называют *эффективностью*. Степень эффективности сложной системы оценивают некоторой количественной мерой — критерием эффективности. Часто эффективность системы характеризуют набором разнородных показателей $I_1, I_2, \dots, I_m$, однако при синтезе или анализе системы их обычно «сворачивают» в один критерий I (например

$$I = \sum_{i=1}^m \alpha_i I_i, \quad \text{где } \alpha_i \text{ — весовые множители } \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1).$$

В качестве такого критерия принимают технико-экономические (прибыль, себестоимость и т. п.), технологические (производительность, к. п. д. и т. д.), организационные (затраты труда на решение задачи) и другие показатели работы системы. Для оценки эффективности систем управления могут применяться такие информационные показатели, как количество переработанной информации за время Δt , вероятность нахождения оптимального управления за заданное время и т. п.

Будем характеризовать «мгновенную» эффективность сложной системы S критерием $I(t)$, усредненную эффективность функционирования на отрезке времени $[0, T]$ — функционалом $\mathcal{E} = \int_0^T I(t) dt$. Значения I и $\mathcal{E}$ зависят

от состояния системы S в каждый момент времени t и режима ее работы в этом состоянии. Часто можно считать, что в нормальных (или расчетных) условиях состояние системы не зависит от режима ее работы, который заранее предопределен для каждого возможного состояния. В такой ситуации значения I и $\mathcal{E}$ зависят только от состояния системы и, следовательно, от надежности и ремонтпригодности входящих в нее элементов. Иными словами, критерии эффективности I и $\mathcal{E}$ служат количественной мерой способности сложной системы выполнять целевое назначение при отказах и восстановлении элементов. Для рассмотренной сложной системы критерий эффективности заменяет характеристики надежности.

Дадим более строгое определение состояния системы, в которую входит n восстанавливаемых элементов. Каждый элемент может быть работоспособным или неработоспособным (ремонтируемым). Присвоим каждому элементу номер $\beta = 1, 2, \dots, n$. Пусть в произвольный момент времени t система находится в некотором состоянии S_β , определяемом числом и номерами отказавших элементов. Например, в состоянии S_1 все элементы системы работоспособны, при отказе элемента с номером $\beta = 1$ система перейдет (для простоты — мгновенно) в состояние S_2 , при выходе из строя элемента с номером $\beta = 2$ система окажется в состоянии S_3 , и т. д. Нетрудно убедиться, что число возможных состояний системы $N = 2^n$.

В процессе функционирования система переходит из одного состояния S_β в любое другое S_j ($j = 1, 2, \dots, N$) вследствие отказов тех или иных элементов или ввода в работу отремонтированных. Оба события происходят в случайные моменты времени, поэтому, считая потоки отказов и восстановлений простейшими, смену состояний системы можно описать марковским случайным процессом с непрерывным временем и дискретным числом состояний. Для подобной системы переход из одного состояния в другое характеризуется числовым показателем — *интенсивностью потока* $\lambda_{\beta j}$ (где $\beta, j = 1, 2, \dots, N$, $\beta \neq j$). В свою очередь, $\lambda_{\beta j}$ зависит от интенсивностей отказов λ и восстановлений μ отдельных элементов. Знание всех интенсивностей $\lambda_{\beta j}$ позволяет вычислять вероятность нахождения системы в состоянии S_β в каждый момент времени. Эта вероятность $P_\beta(t)$ является решением системы линейных дифференциальных уравнений

$$\frac{dP_{\beta}}{dt} = - \sum_{j=1}^N \lambda_{\beta j} P_{\beta}(t) + \sum_{j=1}^N \lambda_{j\beta} P_j(t), \quad \beta = 1, 2, \dots, N$$

В общем случае $\lambda_{\beta j} \neq \lambda_{j\beta}$; $\sum_{j=1}^N P_{\beta}(t) = 1$. Для вычисления P_{β} необходимо задаться $N-1$ начальными условиями $P_1(0), \dots, P_{N-1}(0)$, удовлетворяющими соотношению $\sum_{j=1}^N P_j(0) = 1$, и проинтегрировать систему N уравнений.

Во многих случаях производные dP_{β}/dt достаточно быстро становятся близки к нулю, тогда стационарные вероятности P_{β} возникновения состояний S_{β} находят в виде решения системы линейных алгебраических уравнений

$$P_{\beta} = \sum_{j=1}^N \lambda_{j\beta} P_j / \sum_{j=1}^N \lambda_{\beta j}, \quad \beta = 1, 2, \dots, N$$

Предположим, что сложная система находится в состоянии S_{β} и работает в определенном (например, расчетном или оптимальном) режиме; тогда получим значение критерия I , равное I_{β} . В момент времени t система может находиться в любом из N возможных состояний с вероятностью P_{β} , поэтому математическое ожидание критерия эффективности $I(t) = \sum_{\beta=1}^N P_{\beta}(t) I_{\beta}$, а средняя эффективность работы системы за отрезок $[0, T]$ будет равна

$$\bar{I} = \int_0^T I(t) dt = \int_0^T \sum_{\beta=1}^N P_{\beta}(t) I_{\beta} dt$$

Знание величины $\bar{I}$ позволяет выбирать наиболее эффективную систему из ряда возможных; отыскивать структуру системы и режимы обслуживания элементов, при которых обеспечивается наибольшая эффективность; решать ряд других задач.

Исследование эффективности сложных систем управления сопряжено с рядом трудностей, причем основными являются высокая размерность задачи и малая чувствительность критерия $\bar{I}$ к смене состояний S_{β} .

Как указывалось выше, число состояний системы

$N=2^n$. Поэтому уже при $n=10$ получаем $N=1024$, т. е. понадобится составить матрицу интенсивностей λ_{ij} размером 1024×1024 , проинтегрировать 1024 уравнений и, наконец, тем или иным методом найти столько же значений критерия I_{β} . Решение таких задач (отметим, что система из 10 элементов считается достаточно простой и «небольшой») вызывает существенные технические трудности и делает невозможным анализ результатов. Для уменьшения размерности задачи иногда понятие состояния определяют его числом и номерами «отказавших» функций системы (в частности, такой подход применяют при анализе эффективности АСУТП). Обычно число функций $m < n$, поэтому переход к изучению функциональной эффективности позволяет существенно сократить размерность задачи. (Следует указать, что понятие «отказ» функции также не всегда вводится однозначно и объективно.)

При анализе эффективности сложных систем управления определенные трудности представляет обоснованный выбор критериев I и $\mathcal{E}$. Использование технико-экономических или информационных показателей только системы управления (например, стоимости ее эксплуатации или информационной производительности) не всегда позволяет правильно учесть ее целевое назначение как элемента автоматизированного комплекса, состоящего из технологической схемы и АСУ. Вследствие этого эффективная (по выбранному критерию) система управления может оказаться малополезной при ее работе в составе автоматизированного комплекса, качество функционирования которого оценивается иными критериями.

Использование в качестве критерия эффективности технико-экономических показателей работы всего автоматизированного комплекса (прибыль, себестоимость и т. п.) часто приводит к тому, что величины I и $\mathcal{E}$ становятся малочувствительными (вторая — особенно) к изменениям состояний системы S_{β} . Это затрудняет отыскание наиболее эффективной структуры системы и вынуждает либо вводить иные понятия состояния (например, функциональное), либо искусственно объединять ряд близких (по значениям I) состояний в одно.

В целом многие актуальные задачи оценки эффективности сложных систем управления, в частности АСУТП, требуют более глубоких исследований и разработок.

3.5. ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ПНЕВМО- И ГИДРОАВТОМАТИКИ

Надежность элементов УСЭППА

Показатели надежности пневматических элементов УСЭППА определяют преимущественно в лабораторных условиях. При этом понятие отказа вводят для каждого типа элементов. Например, для усилителей и пневмореле за отказ принимают разгерметизацию контактов типа сопло — заслонка (износ и выпадение заслонки), разгерметизацию камер (разрыв мембраны, засорение сопел и каналов), для аналоговых устройств — изменение класса точности, и т. п. Как правило, элементы считают невосстанавливаемыми и испытывают до первого отказа.

Испытания элементов проводят в различных условиях. Из опыта эксплуатации средств пневмоавтоматики известно, что наиболее существенно на надежность элементов влияют следующие факторы: давление питания P_n ; температура θ и относительная влажность ϕ окружающей среды; частота f (а иногда и амплитуда и форма) входных воздействий (для дискретных элементов); выходная нагрузка V_n устройства; качество сжатого воздуха, применяемого для питания. Лабораторные испытания элементов проводят при различных значениях перечисленных факторов (за исключением последнего).

За основные показатели надежности элементов принимают вероятность безотказной работы $P(t_0)$ в течение фиксированного времени t_0 , наработку на отказ t_n , иногда интенсивность отказов λ и дисперсию времени безотказной работы (для нормального распределения случайной величины T). Как правило, $t_0 = 2000$ ч; для достаточно надежных элементов определяют также $P(5000)$ и $P(8000)$, а для устройств, нуждающихся в частой подстройке — $P(1000)$. Помимо точечных значений t_n^* , $P^*(t_0)$, λ^* вычисляют с доверительной вероятностью $P_d = 0,8$ нижние $t_{n.н.}$, $P(t_0)_н$ и верхние $\lambda_в$ доверительные значения (иногда находят и нижние и верхние оценки).

Лабораторные исследования надежности пневматических элементов делят на определительные и контрольные. Цель определительных испытаний — первоначальное нахождение показателей надежности. Контрольные испытания служат для уточнения параметров на-

дежности или для проверки их соответствия требованиям стандартов или технических условий. Методики этих испытаний имеют некоторые различия.

Определительные испытания проводят для вновь разработанных или модернизированных элементов. Число испытываемых элементов N выбирают из условия обеспечения желаемой достоверности оценок показателей t_n^* , $P^*(t_0)$, λ^* ; обычно принимают $N > 50-100$. Для этого выбирают наиболее вероятные законы распределения оценок и, задавшись доверительной вероятностью $P_d = 0,8$, по соответствующим таблицам распределений случайных величин находят необходимое число N (предположив, что во время опытов выходит из строя 90—95% элементов). Испытания проводят для различных режимов работы, т. е. при разных P_{Σ} , θ , φ , f , V_n .

В ходе испытаний через некоторые отрезки времени Δt проводят контроль состояния элементов и регистрацию числа отказов. Контроль выполняется исследователем, с помощью автоматических сигнализаторов и регистраторов. Отрезок времени Δt между контрольными осмотрами выбирают из эмпирического соотношения $\Delta t \leq \leq 0,1 t_n$, где t_n — предполагаемая наработка элемента на отказ.

Контрольные испытания выполняют на меньшем, чем в определительных опытах, числе элементов. Испытания проводят периодически для одного наиболее характерного режима работы элемента.

При оценке параметров надежности элемента по сравнительно малому числу данных об отказах, полученных при контрольных испытаниях, возможны ошибки изготовителя и потребителя. Первая заключается в том, что надежный элемент объявляют ненадежным; вероятность этой ошибки, или риск изготовителя обозначим α . Вторая состоит в том, что ненадежный элемент объявляют удовлетворяющим приемочным требованиям по надежности; вероятность этой ошибки, или риск потребителя обозначим β . Тактика проведения последовательных контрольных испытаний, учитывающих α и β , заключается в следующем.

Зададимся приемлемыми значениями вероятностей α и β ; обычно $\alpha = 0,1-0,2$; $\beta = 0,2-0,3$. Пусть к моменту времени t зафиксировано $N(t)$ отказов элементов и найдена оценка t_n^* [или $P^*(t_0)$, или λ^*]. Зная закон распределения t_n^* , можно найти минимально допустимое

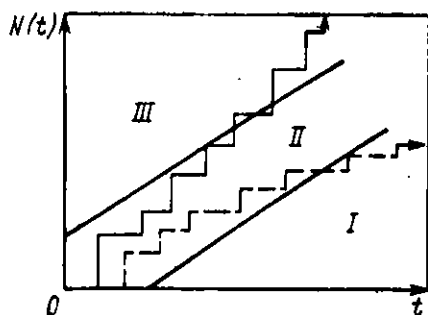


Рис. 3.10. График последовательных контрольных испытаний элемента (I, II, III — области приемки, продолжения опытов и браковки).

число отказов $N'(t)$, которое надо наблюдать при испытании элемента, чтобы с вероятностью β не объявить ненадежное изделие надежным (отвечающим требованиям стандартов). Если $N(t) < N'(t)$, то контрольные испытания окончены, и элемент считается удовлетворяющим требованиям в отношении надежности. При $N(t) > N'(t)$ находят максимально допустимое число отказов $N''(t)$, которое надо наблюдать к моменту времени t , чтобы с вероятностью α не забраковать надежный элемент. Если $N(t) > N''(t)$, элемент объявляют не удовлетворяющим требованиям по надежности, т. е. бракуют. При $N'(t) < N(t) < N''(t)$ контрольные испытания следует продолжать.

На рис. 3.10 представлен график, иллюстрирующий процесс последовательных контрольных испытаний.

Таблица 2. Показатели надежности дискретных элементов УСЭППА

Наименование и тип элемента	Частота сигнала f_0 , Гц	Наработка на отказ, ч		Вероятность безотказной работы P за время t_0 , ч			
		$t_{н-н}$	t_n^*	1000	2000	2000*	8000
Реле ППР.1 и ППР.3	0,3	20000	30000	0,997	0,994	1,0	0,96
Реле ППР.2	0,3	20000	27000	0,996	0,991	0,997	0,95
Клапан ПЗК.1	0,3	20000	30000	0,997	0,994	1,0	0,96
Реле выключающее ПИ108	0,3	20000	30000	0,997	0,994	1,0	0,96
Реле универсальное РУП-1М	0,15	8000	10000	0,98	0,974	1,0	0,57
Реле 0,8.972.069-1М	0,013	5000	—	—	—	0,98	—
Клапан обратный ПЗОК.1	0,15	30000	—	0,963	0,932	0,963	0,90
Клапан двухходовой ПЗК.1	0,3	—	—	0,999	0,998	1,0	0,98
Кнопка ПКН.3	—	—	—	0,985	0,971	—	0,96
Тумблер ПТ.2	—	—	—	0,985	0,971	—	0,96

Таблица 3. Показатели надежности аналоговых элементов УСЭППА

Наименование и тип элемента	Режим работы		Наработка на отказ, ч		Вероятность безотказной работы P за время t_0 , ч			
	$P \cdot 10^{-5}$ Па	t_0 , Гц	$t_{н-н}$	t_n^*	1000	2000	2000*	5000
Элементы сравнения П2ЭС.1 и П2ЭС.3	0,3	0,2	3000	—	0,86	0,56	0,62	—
Повторитель точный П2П.7	0,3	0,02—0,3	30000	—	0,99	0,981	1,0	0,92
Повторитель грубый П2П.3	0,3	0,02—0,3	10000	—	0,867	0,781	0,813	0,72
Повторитель маломощный П2П.1	0,3	0,3	10000	—	0,867	0,781	0,813	0,72
Повторитель со сдвигом П2П.2	0,3	0,02	6000	—	0,863	0,824	0,90	0,57
Задатчик мощный П2ЗД.4	0,6	—	2100	—	—	0,95	0,98	—
Задатчик маломощный П2ЗД.3	0,6	—	5200	—	0,869	0,737	0,80	0,41
Пневмоэлектронпреобразователь П1ПР.4	1,4	0,028	—	4200	0,799	0,721	0,782	0,53
Электронпневмопреобразователь П1ПР.5	20в	0,3	—	5000	0,99	0,983	1,0	0,96
Фильтр ПОФ.1	1,4	0	45000	—	0,998	0,997	—	0,99
Емкость ПОЕ.1	1,4	0	45000	—	0,998	0,997	—	0,99
Дроссели П2Д.4-1 и П2Д.4-2	1,4	—	—	—	0,994	0,989	—	0,979
Дроссель регулируемый П2Д.2М	1,4	—	—	7000	0,997	0,989	1,0	0,976
Индикатор ИП.1	—	0,028	—	400	$P(500)_H = 0,411$	—	—	—

Сплошной линией показан «след испытания» элемента, не прошедшего контрольную проверку, пунктиром — результаты исследования устройства, надежность которого удовлетворяет требованиям.

Проведение последовательных контрольных испытаний позволяет существенно сократить число проверяемых элементов и длительность экспериментов.

Результаты нахождения оценок показателей надежности по данным определительных испытаний (выполненных в ЦНИИКА) типовых дискретных элементов УСЭППА приведены в табл. 2. На вход элементов подавали сигналы типа прямоугольная волна амплитудой $1,4 \cdot 10^5$ Па и частотой 0,02—2,5 Гц. Объем выходной нагрузки принимали равным 10 см³. Испытания элементов проводили при нормальных условиях $P_n = 1,4 \cdot 10^5$ Па, $\theta = 20 \pm 25^\circ\text{C}$, $\varphi = 40\text{—}70\%$ и частоте f_0 (см. табл. 3). Для пересчета значений t_n (t_n^* , t_{n-n}) применительно к другим условиям работы элемента (P_1 , f_1 , θ_1) следует использовать зависимости $t_n^p = k_p t_n^*$, $t_n^f = k_f t_n^*$, $t_n^\theta = k_\theta t_n^*$, где t_n^p , t_n^f , t_n^θ — наработки на отказ при давлении P_1 , частоте f_1 и температуре θ_1 ; k_p , k_θ , k_f — коэффициенты. Для элементов П1Р.1, П1Р.2, П1Р.3, ПЗК.1, П1108 их вычисляют как

$$k_p = (P_1/P_0)^2; \quad k_\theta = \exp \{-8(\theta_1 - 20)/(\theta_1 + 273)\}$$

$$k_f = 0,084/f_1 \text{ при } f_1 < 0,02 \text{ Гц;}$$

$$k_f = 3,3 \exp \{-f_1/0,33\} \text{ при } 0,02 < f_1 < 0,3 \text{ Гц;}$$

$$k_f = 1,0 \text{ при } 0,3 < f_1 < 2,5 \text{ Гц}$$

Для элемента РУП-1М коэффициенты k_p и k_θ вычисляют по тем же формулам; поправочный множитель $k_f = 0,3/f_1$ при $0,15 < f_1 < 0,3$ Гц; $k_f = 1,6$ при $f_1 = 3$ Гц. Если одновременно изменились давление питания (сигнала), температура θ и частота f , то новые значения t_n^1 находят по соотношению $t_n^1 = k_p k_f k_\theta t_n^*$.

В табл. 3 приведены оценки показателей надежности аналоговых элементов УСЭППА, найденные по результатам определительных испытаний при нормальных условиях $P_n = 1,4 \cdot 10^5$ Па, $\theta = 20 \pm 5^\circ\text{C}$, $\varphi = 40\text{—}70\%$. На выходы элементов подавали синусоидальные сигналы амплитудой P (вторая графа табл. 3), частотой f либо постоянное давление P . Показатели надежности некоторых аналоговых элементов существенно зависят от температуры θ и влажности. Так, оценки $t_n = (t_{n-n}, t_n^*)$

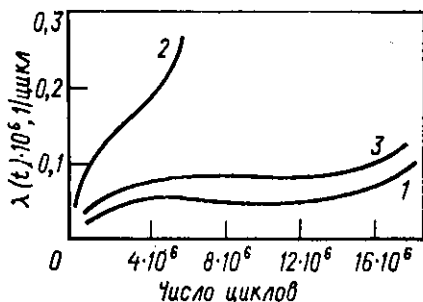
Рис. 3.11. Экспериментальные λ -характеристики:
1 — для реле П1Р.1; 2 — для реле П1Р.2; 3 — для реле П1Р.2.

элементов П2П.7, П2П.3, П2П.1 и П2П.2, работающих при температуре θ_1 , следует изменять в k_Q раз, где $k_Q = \exp\{-q(\theta_1 - 20)/(\theta_1 + 273)\}$, $q = 8$.

Для задатчика П234.4 поправочный множитель по температуре $q = 13$, а при относительной влажности воздуха выше 80% значение t_n^* уменьшается в 4 раза.

В главе 1 дано краткое описание ряда миниатюрных аналоговых и дискретных элементов пневмоавтоматики; повторителей давления ПАМП-1, 2, 3, задатчика ЗАМП-1, сумматора СМАМП, дросселей САМП-1, 2, 3, 4, емкости ЕАМП, компаратора КАМП, клапана КЛАМП, модуля интегрального ПИМИ. Указанные элементы характеризуются достаточно хорошими показателями надежности. Так, нижняя доверительная вероятность безотказной работы за 2000 ч составляет 0,98 для всех перечисленных элементов, срок службы равен 6—8 лет, а технический ресурс за это время превышает 16 000 ч.

Анализ экспериментально полученных интенсивностей отказов $\lambda^*(t)$ показывает, что для большинства элементов УСЭППА период зрелости $t_{II} - t_I$ невелик по сравнению с t_n . Большинство отказов элементов (особенно мембранных) возникает вследствие физического износа отдельных частей (мембран, заслонок, клапанов), поэтому случайная величина T подчиняется, как правило, усеченному нормальному закону с параметрами σ^* (для большинства элементов отношение $\sigma^*/t_n^* = 0,3 - 0,35$). На рис. 3.11 в качестве примера показаны экспериментальные λ -характеристики ряда элементов.



Надежность средств коммутации пневматических сигналов

Для коммутации пневматических сигналов широко используют гибкие трубки, штуцеры, переходники, размножители (тройники), прокладки, разъемы, коммута-

ционные платы и т. п. Надежность устройств и приборов в существенной мере определяется безотказностью средств коммутации сигналов. Особенность изучения надежности средств коммутации обусловлена тем, что для них отсутствуют какие-либо технические характеристики и требования к качеству функционирования. Кроме того, большую практическую ценность представляют показатели надежности не только каждого конкретного средства коммутации, но и их определенных комбинаций, например, трубка — тройник, прокладка — разъем и т. п.

При исследовании надежности средств коммутации в ЦНИИКА в качестве отказа рассматривали нарушение герметичности (трубки, разъема, прокладки, пары трубка — тройник, контактной пары, каналов плат), нарушение проводимости трубок и каналов плат, нарушение автономности внутрислатных каналов («коррозия» каналов).

Определительным испытаниям подвергали девять типов трубок внутренним диаметром $d=3-4$ мм, толщиной стенки $\delta=1-1,5$ мм, изготовленных из поливинилхлорида с разными добавками; латунные тройники диаметром $d_1=3-4$ мм и полиэтиленовый тройник $d_1=3$ мм. Соединения трубка — тройник испытывали при периодических изменениях давления $P=(0-1,7) \cdot 10^5$ Па с частотой 0—1 Гц, а также при постоянном давлении $P=(1,7-4,5) \cdot 10^5$ Па. Кроме того, осуществляли многократный демонтаж и монтаж соединений, а также предварительный нагрев концов трубок перед монтажом (для придания им большей гибкости).

Анализ результатов испытаний позволяет сделать ряд полезных для практики выводов:

наиболее характерные отказы соединений (нарушения герметичности контактов) появляются практически одновременно во всех исследуемых режимах (разброс во времени составляет примерно 10 ч);

оценки $P(t_0)_n$, t_n^* , $t_{н-н}$ фактически не зависят от формы сигналов с амплитудой меньше $1,7 \cdot 10^5$ Па;

при увеличении давления воздуха до $3,5 \cdot 10^5$ и $4,5 \cdot 10^5$ Па существенно (на 1—2 порядка) снижается оценка t_n^* ;

при подогреве концов трубок перед монтажом до 70°C t_n^* уменьшается примерно в три раза;

в достаточно полной мере удовлетворяют требованиям надежности и удобства монтажа гибкие голубые

трубки из поливинилхлорида (ПВХ) рецептуры СТ-18 (ТУ-6-01-1196—79), $d=4 \times 1,5$, для которых $P(2000)_H = 0,995$, $t_{H-H} = 20\,000$ ч, средняя наработка на число демонтажей $t_d = 140$, а также белые трубки из ПВХ марки ТВ-40, $d=4 \times 1,2—1,5$ мм, $d=3$ мм $\times$ 1,0 мм, для которых $P(2000)_H = 0,996$, $t_{H-H} = 20\,000$ ч, $t_d = 140$ демонтажей;

не удовлетворяют требованиям надежности соединения, в которые входят полиэтиленовые тройники $d_1 = 3$ мм;

обладают низкой надежностью трубки желтого цвета из полимерных материалов ПМ (ТУ 64-1-2813—75), из ПВХ рецептуры СТ-18, $d=4 \times 1,5$ мм, а также трубки из ПВХ марки ТВ-40 (ГОСТ 19034—73), $d=4 \times 1,0$ мм.

Показатели надежности монтажных плат, разъемов и уплотнительных средств определяли по данным, полученным в процессе нормальной эксплуатации в различных климатических условиях пневматических систем управления типа «Центр», «Нефть», «Пуск» (см. гл. 4). Полученные оценки показателей надежности таковы:

для уплотнительных прокладок $t_n^* = 10\,000—16\,000$ ч;

для разъемов $t_{H-H} = 22\,000—50\,000$ ч;

для плат из оргстекла $t_n^* = 10\,000$ ч;

для контактов трубка — тройник, трубка — штуцер $t_{H-H} = 22\,000$ ч;

для гибких трубок $t_{H-H} = 35\,000—50\,000$ ч;

для гибких трубок под давлением $5 \cdot 10^5$ Па $t_{H-H} = 22\,000$ ч.

Надежность релейных элементов пневмоники

Под отказом струйного элемента понимают устойчивый выход за установленные нормы некоторого параметра (давление, гидравлическое сопротивление, расход, скорость изменения давления и т. п.). Элементы пневмоники испытывали при частоте срабатывания 100 Гц на отрезке времени 1400 ч. Нижняя оценка вероятности безотказной работы за 1300 ч составляла 0,98.

Качество работы релейных элементов характеризуется также числом случайных сбоев — самоустраняющихся отказов. Для дискретных элементов пневмоники среднее число срабатываний между двумя сбоями равно $2,8 \cdot 10^9$, а наработка на сбой — 2370 ч (при частоте входного сигнала 100 Гц). Время приработки элементов

струйной техники составляет 300 ч, на интервале $[t_I, t_{II}]$ интенсивность отказов (сбоев) практически постоянна.

Надежность пневматических и гидравлических устройств

Показатели надежности промышленных пневматических и гидравлических регуляторов определяли путем анализа данных об их отказах в условиях эксплуатации на ряде химических и металлургических заводов. Наблюдения вели за регуляторами и другими средствами автоматизации, прошедшими период приработки и не достигшими периода «старости». Вследствие этого оценки интенсивностей отказов всех изучаемых устройств не зависели от времени, что позволило классифицировать поток отказов как простейший. Оценки времени наработки на отказ некоторых регуляторов и регулирующих устройств приведены ниже:

Устройство	Наработка на отказ, ч
ПИ-регулятор типа 4РБ	9840
Блок предварения типа БП-28	1440
Пневматический регулятор уровня РУКЦ	9360
Пневматический мембранный исполнительный механизм	6840
Гидравлический И-регулятор	9500
Гидравлический исполнительный механизм	80 600
Электрический исполнительный механизм	5300

Из анализа приведенных данных следует, что показатели надежности гидравлических исполнительных механизмов на порядок выше, чем пневматических и электрических устройств, выполняющих те же функции в примерно одинаковых условиях эксплуатации.

Исследования показателей надежности серийных регуляторов «Старт» в лабораторных и промышленных условиях не проводились, что отчасти объясняется трудностью объективного определения отказа и достаточно хорошими эксплуатационными характеристиками этих устройств. Вместе с тем имеющийся опыт исследования надежности отдельных агрегатно-функциональных блоков пневматических систем «Пуск» и «Центр» (см. гл. 4) показывает, что оценка времени наработки на отказ устройства автоматического регулирования составляет порядка 30 000 ч. Для реализации функции регулирования в системах «Пуск» и «Центр» применяют, как правило, серийные регуляторы «Старт».

СИСТЕМЫ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ ДЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

4.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Пневматические системы управления нашли широкое распространение при автоматизации химических производств, что объясняется не только простотой их обслуживания, взрыво- и пожаробезопасностью, но и сравнительно низкой стоимостью (в среднем на 30% ниже стоимости аналогичных электронных устройств). Сравнительно небольшое быстродействие пневматических систем не является принципиальным ограничением их применения, так как объекты управления в химической промышленности обычно достаточно инерционны.

Чисто пневматические средства применяют в тех случаях, когда при контроле и управлении автоматизируемым объектом требуется выполнить сравнительно небольшой объем простых вычислительных операций. Кроме того, пневматические системы сложно использовать при автоматизации территориально распределенных объектов, поскольку приходится устанавливать промежуточные усилители пневмосигналов. Поэтому в последние годы все большее распространение находят комбинированные пневмоэлектронные системы, которые строятся по иерархическому принципу. На нижнем уровне таких систем используют высоконадежную и взрывобезопасную пневматическую аппаратуру, с помощью которой реализуются простейшие функции централизованного контроля и регулирования параметров объекта. Верхний уровень строят на базе ЭВМ, которая рассчитывает технико-экономические показатели, оптимальные задания для пневматических регуляторов, входящих в состав подсистем нижнего уровня. Связь пневматических регуляторов с ЭВМ осуществляется через преобразователи, которые последовательно преобразуют коды ЭВМ в электрический сигнал, а последний — в пневматический. При этом либо преобразователи устанавливают индивидуально для каждого контура регулирования, а ЭВМ по очереди «обегают» их, либо используют общий преобразователь, выход которого с помощью специального коммутатора подключен к

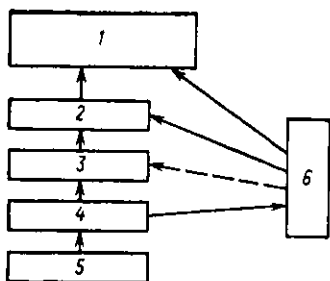


Рис. 4.1. Структура средств пневмоавтоматики:

1 — пневматические системы автоматизации; 2 — блоки; 3 — модули; 4 — ячейки; 5 — элементы; 6 — приборы.

тому регулятору, задание для которого должно быть изменено по сигналу от ЭВМ. Работой коммутатора также управляет ЭВМ.

Каждая из указанных схем построения иерархической системы имеет достоинства и недостатки. В частности, при использовании индивидуальных преобразователей структура системы управления проще. Однако при этом, естественно, возрастает количество применяемой аппаратуры и снижается быстродействие системы, так как сформированное ЭВМ новое задание каждому из регуляторов передается не сразу, а небольшими приращениями в моменты подключения машины к данному контуру регулирования. Этот недостаток исключен в системах со специальным коммутатором выходного сигнала преобразователя, однако отказ коммутатора или преобразователя в такой системе приводит к общей потере связи между всеми пневматическими регуляторами и ЭВМ.

Дальнейшее развитие и миниатюризация электропневмо- и пневмоэлектрических преобразователей позволит в еще большей степени использовать в промышленности комбинированные пневмоэлектронные системы, сочетающие преимущества пневматических и электронных средств автоматизации.

Рассмотрим используемые в промышленных системах контроля и управления средства пневмоавтоматики. Структура их представлена на рис. 4.1. И функционально, и конструктивно системы пневмоавтоматики строятся по принципу *от простого к сложному*: элемент — ячейка — модуль — блок — система.

Первой функционально-конструктивной единицей системы пневмоавтоматики является *элемент*, предназначенный для выполнения простейшей операции над входными сигналами (эти операции, как правило, не имеют самостоятельного значения). Примерами элементов являются трехмембранное реле, дроссель, емкость, тумблер и т. д. Комбинация элементов образует *ячейку*,

выполняющую самостоятельную операцию. Примерами ячеек служат интегратор, состоящий из дросселя, емкости и сумматора; апериодическое звено, образованное дросселем и емкостью, и т. д. Обычно ячейки не оформляют в самостоятельную конструкцию.

Несколько ячеек, соединенных между собой и предназначенных для реализации самостоятельной функции, например, умножения на константу, называют *модулем*. Модуль является основной функциональной, монтажной и ремонтной единицей пневмоавтоматики. Различные модули можно сочетать между собой и использовать как конструктивную единицу при разработке и монтаже сложных АСР. Конструктивно модуль обычно выполняется в виде унифицированной платы с пневмоэлементами (соединенными жестким внутренним печатным монтажом) и колодками для коммутации.

Модули, собранные в единый комплекс и реализующие одну или несколько достаточно сложных функций, составляют *блок* (например, блок обработки информации, блок управления и т. д.).

В приведенной классификации в качестве отдельной функциональной и конструктивной единицы можно выделить *прибор*, имея в виду заверщенное устройство, приспособленное для самостоятельного использования. До внедрения в промышленность элементов УСЭППА разработку пневматических систем управления проводили с помощью приборов, которые представляли собой жесткую конструкцию и позволяли реализовывать агрегатный принцип построения средств автоматизации.

Согласно агрегатному принципу, система управления строится из стандартных блоков и приборов (например, блоки и приборы АСУ), каждый из которых выполняет определенную законченную функцию. В этом случае система автоматики реализуется в традиционном щитовом варианте, когда приборы располагают на отдельных панелях щита управления. Функции такой системы управления ограничены возможностями имеющихся в номенклатуре приборов, а для реализации новых функций требуется разработка специальных приборов. Такой путь, естественно, связан с длительными конструкторскими изысканиями.

Внедрение в промышленность элементов УСЭППА позволило перейти к элементному, а затем и к модульно-блочному принципу построения системы, что корен-

ным образом изменило возможности пневмоавтоматики и конструктивное оформление таких систем. В этом случае на систему управления могут быть возложены достаточно сложные функции с возможностью варьирования их путем изменения набора применяемых универсальных модулей (при модульно-блочном принципе построения) или числа и типа применяемых пневмоэлементов (при элементном принципе построения).

В промышленной пневмоавтоматике в настоящее время используют преимущественно модульно-блочный принцип, позволяющий сохранить гибкость системы и в то же время типизировать ряд конструкций, что затруднено при элементном принципе построения. При модульно-блочном принципе построения систем блоки располагают в отдельных шкафах, которые могут быть объединены между собой.

Возможно несколько способов монтажа модулей в блоках: объемный, плоский, плоско-объемный (смешанный). При *объемном монтаже* для каждого модуля, входящего в блок, выделяется определенный объем. Такой способ монтажа позволяет значительно сократить габариты системы, однако обслуживание ее, доступ к модулям и элементам при этом обычно существенно затруднены. При *плоском способе монтажа* модули, входящие в блок, располагают в одной плоскости (рис. 4.2). Тем самым обеспечивается удобный доступ к модулям, хотя общие габариты системы возрастают. *Плоско-объемный способ монтажа* предусматривает расположение модулей в нескольких параллельных плоскостях (обычно в двух). Это позволяет при сравнительно небольших габаритах системы обеспечить удобство ее обслуживания и ремонта.

В настоящее время промышленностью выпускается ряд достаточно сложных пневматических средств и систем автоматики, построенных на базе элементов УСЭППА. Системы пневмоавтоматики в основном предназначены для стабилизации отдельных координат технологического процесса, т. е. для решения задач первого, нижнего, уровня иерархической системы управления; в ряде случаев с их помощью реализуют также простейшие вычислительные операции, выполнение которых необходимо для управления процессом (например, при управлении по косвенным переменным, определяемым расчетным путем). К таким средствам пневмоавтомати-

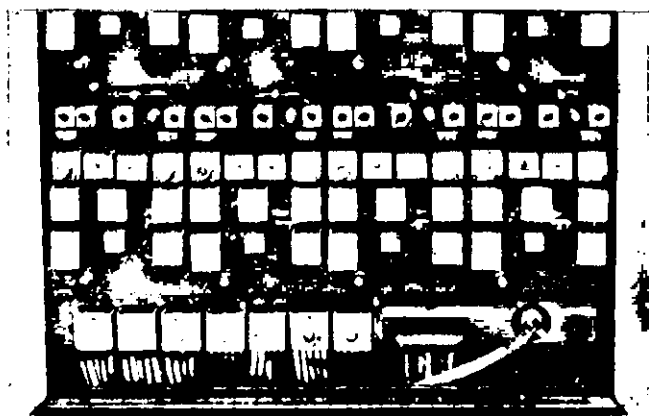


Рис. 4.2. Плоский способ монтажа модулей.

ки относится и система «Старт» (см. раздел 4.4), включающая кроме регуляторов, рассмотренных в главе 1, также вторичные приборы, станции управления и ряд вспомогательных устройств. Комплекс аппаратуры «Старт» составляет центральную часть пневматической ветви Государственной системы промышленных приборов, в которую входят также различные датчики, преобразователи, регулирующие органы и т. д., что позволяет строить на базе аппаратуры пневмоавтоматики различные АСР.

Сложные системы пневмоавтоматики содержат от 250 до 2000—3000 элементов УСЭППА, а также средства контроля за ходом технологического процесса (вторичные показывающие и регистрирующие приборы и др.) и поэтому являются автономными системами, которые можно использовать независимо от традиционных средств автоматизации или же вместо них. Появление таких систем связано с резким увеличением объемов информации при автоматизации технологических агрегатов большой единичной мощности. Применение сложных систем пневмоавтоматики, реализуемых с помощью агрегатно-функциональных комплексов, позволяет ввести ряд новых функций: автоматический контроль и сигнализацию отклонений координат от их заданных значений, измерение переменных по вызову, цифровую регистрацию координат и т. д. При этом удастся существенно сократить общее число показывающих и регистри-

рующих приборов, необходимых для контроля и управления технологическим процессом, при одновременном расширении функций, реализуемых системой. Такая пневматическая система обычно проще и в большинстве случаев существенно надежнее, чем система на электрических средствах автоматики и ЭВМ, реализующая аналогичные функции.

По форме обрабатываемых сигналов системы пневмоавтоматики можно разделить на аналоговые, дискретные и аналого-дискретные.

Аналоговые системы в основном используют в системах управления непрерывными химико-технологическими процессами. С их помощью обычно осуществляют автоматическая стабилизация, контроль и сигнализация об отклонениях координат объекта от заданных значений. Примером такой системы может служить система «Центр».

Дискретные системы используют при автоматизации периодических производств, когда управление носит дискретный, переключательный характер (например, системы «Центр — Логика», «Корд»).

Аналого-дискретные системы применяют в тех случаях, когда требуется непрерывное аналоговое управление отдельными координатами и выполнение таких операций дискретного характера, как пуск и останов объекта, аварийная защита и др. К числу таких систем относится пневматическое управляющее устройство для автоматизации химических реакторов типа «Автооператор», в котором схемы стабилизации построены на аналоговой аппаратуре, а логические схемы управления и блокировки выполнены с помощью дискретных схем пневмоавтоматики.

4.2. ПОСТРОЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ АСР

Рассмотрим структурные схемы пневматических одноконтурных АСР. Общая структурная схема одноконтурной системы стабилизации координаты была рассмотрена во введении (см. рис. В.1). На рис. 4.3 приведена укрупненная блок-схема такой системы. Она включает объект регулирования 1 с одной стабилизируемой координатой y , которая измеряется первичным преобразователем (датчиком) 2 и регистрируется вторичным прибором 3. Заданное значение координаты устанавли-

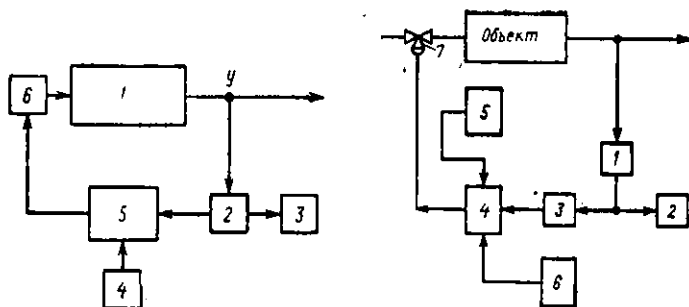


Рис. 4.3. Блок-схема пневматической АСР:

1 — объект; 2 — датчик; 3 — вторичный прибор; 4 — задатчик; 5 — регулятор; 6 — регулирующий орган.

Рис. 4.4. Блок-схема релейной пневматической АСР:

1 — объект; 2 — вторичный прибор; 3 — позиционный (релейный) регулятор; 4 — реле переключения; 5, 6 — пневматические переключатели; 7 — регулирующий орган.

вается задатчиком 4, контролируется вторичным прибором и поддерживается регулятором 5 путем воздействия на регулирующий орган 6.

Подобные АСР могут быть релейными или аналоговыми (непрерывными).

Релейные пневматические АСР

Для стабилизации координат некоторых промышленных объектов допустимо применение релейных регуляторов. При использовании средств пневмоавтоматики релейный закон может реализоваться серийным регулятором системы «Старт» или устройством, собранным из типовых пневматических элементов. Структурная схема такой АСР представлена на рис. 4.4. Переход с ручного дистанционного управления на автоматическое и обратно осуществляется с помощью пневмотумблера 5, управляющего реле переключения 4. Дистанционное управление исполнительным механизмом 7 ведется с помощью пневмотумблера 6. Контроль за координатой, измеренной датчиком 1, осуществляется с помощью вторичного прибора 2, в качестве которого обычно используют показывающий прибор, реже — записывающий с одной шкалой. Заданное значение координаты устанавливают с помощью задатчика 8.

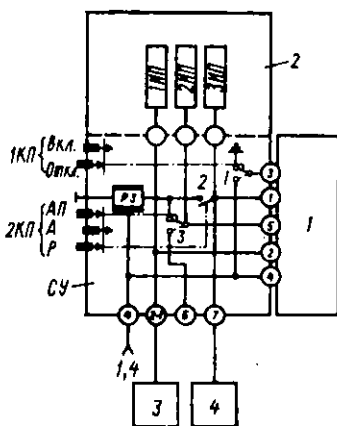


Рис. 4.5. Блок-схема одноконтурной пневматической АСР:

1 — пневматический регулятор; 2 — вторичный прибор со станцией ручного управления; 3 — пневматический датчик; 4 — регулирующий орган.

Релейные пневматические АСР могут строиться с использованием станции управления, входящей в систему «Старт». В этом случае структура системы практически не отличается от обычной аналоговой (непрерывной) пневматической АСР, реализованной на регуляторах «Старт». Построение такой системы рассмотрено ниже.

Непрерывные пневматические АСР

Простейшая одноконтурная пневматическая АСР содержит вторичный прибор с тремя измерительными шкалами и станцией управления, пневматический регулятор, первичный преобразователь (датчик) и исполнительный механизм (рис. 4.5). Вторичный прибор служит для контроля регулируемой координаты, задания регулятору (которое устанавливается с помощью задатчика, встроенного в станцию управления) и подачи сигнала на исполнительный механизм. Схема реализации АСР не зависит от того, какой регулятор системы «Старт» используют (П, ПИ, или ПИД). АСР может работать в двух различных режимах регулирования параметра — ручном дистанционном или автоматическом. Выбор режима функционирования системы осуществляется с помощью станции управления (СУ).

Станция управления имеет два кнопочных переключателя 1КП и 2КП и задатчик ручного управления РЗ. При ручном дистанционном управлении нажаты кнопки «Откл.» и «Р». При нажатии кнопки «Откл.» пневмоконттакт 1 опускается вниз и соединяет клемму питания 4 с клеммой 3, подключенной к выключающему реле регулятора. При этом регулятор отключается от линии 7 к исполнительному механизму 4, к которой при нажатии кнопки «Р» через контакт 2 подключается задатчик ручного управления РЗ. В рассматриваемом режиме задатчик служит для ручного дистанционного регулирования координаты объекта. Выходной сигнал

датчика подается также через пневмоконтакт *в* на входную клемму 5, подключенную к камере задания регулятора и параллельно к измерительному прибору 2ИП.

Для перехода с ручного управления на автоматическое необходимо нажать кнопку А переключателя на станции управления. Контакт при этом разомкнется, и РЗ отключится от пневмолинии ведущей к исполнительному механизму. В этом положении кнопки пневматический сигнал от РЗ подается только в камеру задания регулятора и контролируется прибором 2ИП. На исполнительном механизме запомнится сигнал, поступивший от датчика до его отключения. Чтобы обеспечить «безударный» переход от ручного управления к автоматическому, необходимо прежде чем нажать кнопку «ВКЛ», установить с помощью датчика РЗ сигнал задания, равный сигналу от датчика. Контроль за этой операцией осуществляется с помощью измерительных шкал приборов 1ИП и 2ИП. При нажатии на кнопку «ВКЛ» контакт 1 переключается, камера отключающего реле через штеккер 3 и пневмоконтакт 1 соединяется с атмосферой, а выход регулятора оказывается подключенным к исполнительному механизму. Выходной сигнал регулятора контролируется по измерительной шкале ЗИП, отградуированной в процентах открытия регулирующего органа.

Кнопка АП служит для перевода АСР в режим программного регулирования. При нажатии на эту кнопку камера задания регулятора через штеккер 5 и контакт 3 сообщается со штуцером 6, к которому подсоединен программный датчик. При простой стабилизации координаты на заданном значении, когда программный датчик отключен, штуцер 6 заглушают.

В рассмотренной схеме регулятор с помощью специального разъема установлен на вторичном приборе. Тем самым удается существенно упростить схему АСР. В этом случае в системе имеется всего две линии связи: одна — от датчика к регулятору (вторичному прибору), другая — от регулятора через вторичный прибор к исполнительному механизму. Однако, если вторичный прибор находится на большом расстоянии от объекта управления, использование такой схемы приводит к значительным запаздываниям в пневмолиниях. Поэтому устанавливать регулятор на вторичном приборе целесообразно при небольшой удаленности последнего от объекта либо при автоматизации достаточно инерционных объектов.

В некоторых случаях регулятор устанавливают в непосредственной близости от первичного преобразователя и исполнительного механизма, на расстоянии от вторичного прибора (рис. 4.6). Связь регулятора со вторичным прибором (который используется для контроля за регулируемой координатой и управления режимами работы АСР) осуществляется через усилители мощности, выполняющие в данном случае функции

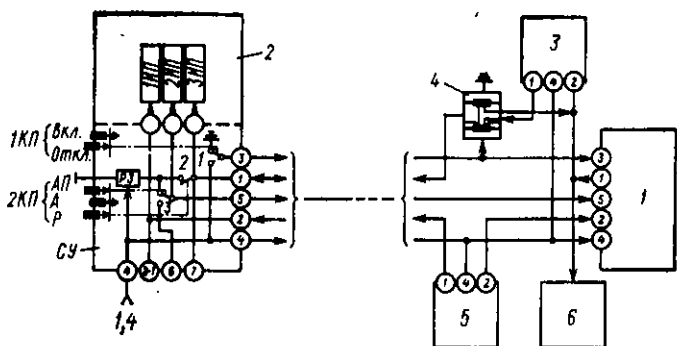


Рис. 4.6. Блок-схема пневматической АСР с регулятором, установленным около регулирующего органа:

1 — пневматический регулятор; 2 — вторичный прибор со станцией ручного управления; 3 — усилитель мощности; 4 — реле переключения; 5 — пневматический датчик; 6 — регулирующий орган.

пневмоповторителей с мощным выходом. При этом пневматический сигнал от клеммы 1 может подаваться по линии от регулятора к измерительному прибору (при автоматическом регулировании) или от ручного задатчика РЗ к регулятору и исполнительному механизму (при ручном дистанционном управлении). Поэтому установленный на линии усилитель мощности работает в комплекте с переключающим реле, которое управляется автоматически от станции управления сигналом, поступающим на отключающее реле регулятора.

Естественно, что при такой схеме установки элементов АСР требуется прокладка всех четырех пневмолиний связи между регулятором и вторичным прибором (линии управления отключающим реле, задания регулятору, сигнала от датчика, контрольного сигнала выхода регулятора). При этом питание к регулятору и усилителю мощности в ряде случаев целесообразно подводить не через вторичный прибор, а непосредственно. В ряде случаев необходимо прокладывать между регулятором и вторичным прибором пять импульсных линий.

Рассмотренные схемы используют в тех случаях, когда нужный закон стабилизации (П, ПИ или ПИД) реализуется с помощью одного регулирующего блока системы «Старт». Однако если необходимо осуществить ПД-закон, приходится применять два прибора: П-регулятор ПР2 и устройство предварения ПФ2.1. В некоторых случаях, например при модернизации АСР, и ПИД-

регулятор может реализовываться не одним блоком ПРЗ.35, а двумя: ПИ-регулятором и устройством предварения. Соединение этих блоков может быть последовательным или параллельным.

При реализации ПИД-закона путем параллельного соединения регуляторов используют сумматор 3 (рис. 4.7, а), в который вводятся сигналы от блока предварения и регулятора. Кроме того, для выделения из сигнала на выходе блока предварения производной необходимо вычитать значение регулируемой координаты (см. раздел 1.2). Эту операцию также осуществляют с помощью сумматора 3. Достоинством параллельной схемы реализации ПИД-регулятора является независимость настройки Д-составляющей от настройки П- и И-составляющих. Однако эта схема требует дополнительной аппаратуры (сумматора) и, кроме того, действие Д-составляющей проявляется лишь при изменении регулируемой координаты (на вариации задания эта составляющая не реагирует, так как задание в блок предварения не подается, что видно из рисунка). При построении стабилизирующих АСР данное обстоятельство несущественно, так как задание в этом случае постоянно; однако для программных и следящих систем, когда задание изменяется, это может оказаться существенным.

При последовательном соединении регуляторов (рис. 4.7, б) сумматор отсутствует, поэтому аппаратная реализация такой схемы проще. Однако в этом случае настройки регуляторов взаимосвязаны, и возможный диапазон их изменения ограничен: отношение времени предварения $T_{пр}$ к времени изодрома $T_{и}$ не может превышать 0,25. Для того, чтобы Д-составляющая отрабатывалась как при изменении регулируемого параметра, так и при изменении задания, устройство пред-

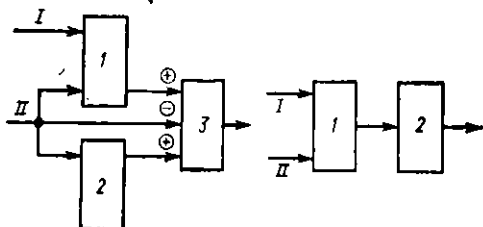


Рис. 4.7. Блок-схемы ПИД-регулятора:

а — параллельная; б — последовательная; 1 — ПИ-регулятор; 2 — ПД-регулятор; 3 — сумматор; I, II — заданное и измеренное значения параметра.

варения при последовательном соединении устанавли-
вают после регулирующего блока.

Для многих объектов ограничение на настройки регулятора $T_{др}/T_{ж} < 0,25$ не является решающим, поэтому более простую в аппаратурном отношении схему последовательного соединения регуляторов используют чаще. При этом регулятор можно устанавливать либо около вторичного прибора (тогда необходимы лишь две линии связи с объектом), либо около датчика и исполнительного механизма (что позволяет уменьшить инерционность АСР, однако требует дополнительной установки усилителей и применения пяти или четырех пневмолиний).

В соответствии с требованиями технологического процесса, регулируемую координату либо стабилизируют на заданном значении, либо изменяют по заранее заданной программе, либо изменяют величину задания в зависимости от произвольного во времени изменения какой-то другой переменной (следящие системы). Рассмотрим варианты построения пневматических АСР для двух последних случаев.

Пневматические системы программного регулирования

Программные АСР отличаются от систем стабилизации тем, что задание в них не постоянно, а изменяется по заранее заданной программе. Программные АСР нашли широкое применение при автоматизации периодических процессов, при автоматизации операций пуска и останова объектов и т. п. При реализации схем программного регулирования обычно используют такую же станцию управления, как и в стабилизирующих АСР. Однако в этом случае для изменения задания применяют программный задатчик, присоединяемый к штеккеру 6 (рис. 4.8). Вторичный прибор при этом должен иметь четыре измерительные шкалы, так как теперь необходимо контролировать и сигнал от задатчика. Программа изменения задания определяется профилем кулачка программного задатчика и скоростью его вращения.

Переключение АСР с режима автоматической стабилизации на программное регулирование осуществляется нажатием кнопки АП в переключателе 2КП. Переключение производится в момент, когда сигналы програм-

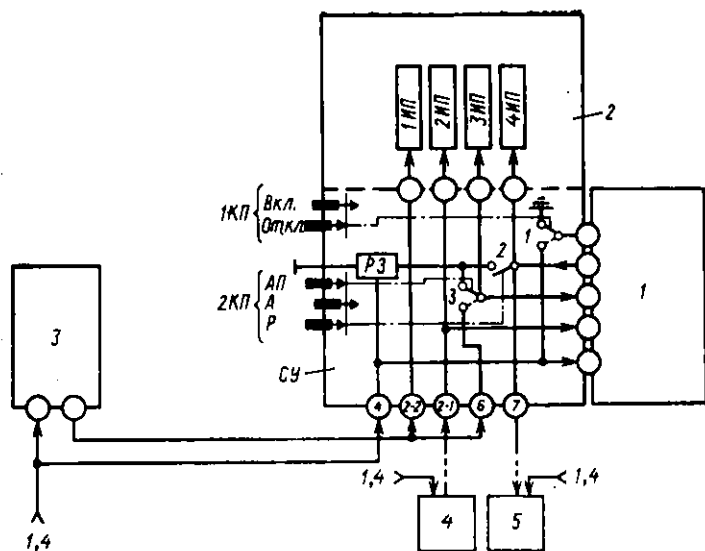


Рис. 4.8. Блок-схема пневматической программной АСР:

1 — регулятор; 2 — вторичный прибор со станцией управления; 3 — программный задатчик; 4 — пневматический датчик; 5 — регулирующий орган.

много и ручного задатчиков равны. При этом происходит переключение пневмоконтакта 3 так, что камера задания регулятора соединяется через штеккер 6, пневмоконтакт 3 и штеккер 5 с выходом программного задатчика.

Переключение АСР с режима программного регулирования на автоматическую стабилизацию или на ручное дистанционное управление осуществляется нажатием соответствующей кнопки в переключателе 2КП. Для обеспечения «безударного» перехода предварительно при отключенном регуляторе (нажата кнопка «Откл.» переключателя 1КП) выполняют корректировку сигнала ручного задатчика до нужного значения.

Пневматические следящие АСР

В следящей АСР заданное значение координаты определяется какой-либо другой, произвольно меняющейся во времени, переменной. Следящей является, например, АСР, поддерживающая заданное соотношение между задающей и регулируемой координатой. Такие системы

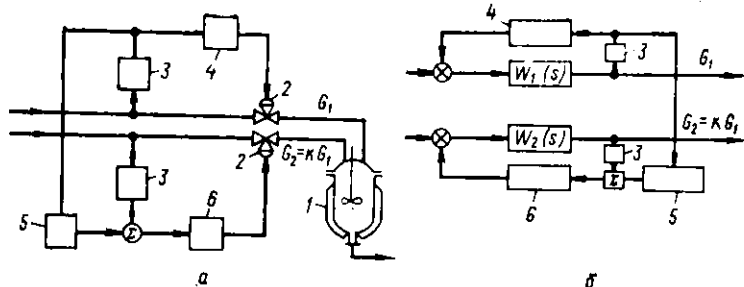


Рис. 4.9. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы регулирования соотношения:

1 — реактор; 2 — регулирующие органы; 3 — датчики расхода; 4 — регуляторы; 5 — множительное устройство.

применяют для регулирования соотношения двух реагентов на входе реактора, расходов топлива и воздуха в процессах горения, расходов пара и воды в вакуум-сушильных установках и т. п.

Принципиальная и структурная схемы регулирования соотношения представлены на рис. 4.9. Задачей регулятора 6 является поддержание заданного соотношения двух расходов: независимого G_1 и зависимого G_2 . При этом расход G_2 отслеживает изменение расхода G_1 ($G_2 = kG_1$). Стабилизирующий регулятор 4 поддерживает G_1 на заданном значении. Возможно также построение подобных следящих систем без использования регулятора 4, когда по условиям технологического процесса нельзя стабилизировать расход G_1 (например, на промежуточных стадиях процесса при отсутствии буферных емкостей). Реализация таких схем возможна либо на базе регулятора соотношения системы «Старт» типа ПРЗ.33, либо с помощью ПИ-регулятора, работающего совместно с устройством умножения на постоянный коэффициент (с помощью которого устанавливается коэффициент соотношения).

При построении АСР соотношения расходов следует иметь в виду нелинейную (квадратичную) зависимость выходного сигнала датчика от измеряемого расхода. Если один датчик, измеряющий расход, имеет линейную характеристику, а другой — квадратичную зависимость выходного сигнала от расхода, то в схеме необходимо использовать линеаризующее устройство (например, блок извлечения квадратного корня). Отсутствие устройства линеаризации приведет к тому, что

коэффициент соотношения расходов будет переменным. Если у обоих расходомеров квадратичные характеристики, то устройства линеаризации следует применять лишь в том случае, когда расходомеры работают на существенно различных участках шкалы.

Пневматические каскадные АСР

Для улучшения качества переходных процессов в объектах регулирования, в которых можно измерять промежуточные координаты, сравнительно часто применяют каскадные АСР (рис. 4.10). В каскадных схемах вводится стабилизация некоторой промежуточной координаты с помощью вспомогательного регулятора. Задание вспомогательному регулятору устанавливается главным регулятором, стабилизирующим основную выходную координату.

Примером подобной АСР может служить схема каскадного регулирования температуры в химическом реакторе (рис. 4.10,б). Вспомогательный регулятор 2 изменяет расход охлаждающей жидкости в рубашке реактора, поддерживая в ней значение температуры, которое задается главным регулятором 1, обеспечивающим стабилизацию температуры в самом реакторе. Таким образом, в рассматриваемой двухкаскадной АСР имеется два контура регулирования — внутренний (вспомогательный) и внешний (основной), стабилизирующий на заданном значении основную переменную — температуру в реакторе. В практике автоматизации иногда используют и более сложные (трех-, а иногда и четырехконтурные) системы. Применение таких схем оказывается эффективным, если инерционность вспомо-

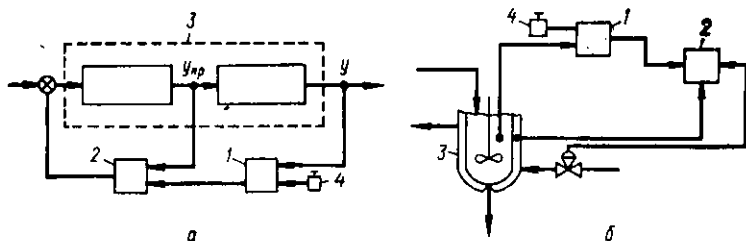


Рис. 4.10. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы каскадного регулирования:

1, 2 — главный и вспомогательный регуляторы; 3 — объект; 4 — задатчик.

гательного контура существенно меньше инерционности контура регулирования основной координаты, а возмущения поступают на объекты внутреннего и внешнего контуров.

При реализации таких схем на средствах пневмоавтоматики должны быть установлены специальные устройства, с помощью которых ограничивается сверху и снизу сигнал задания для вспомогательного регулятора, поступающий от главного регулятора. Необходимость таких ограничений объясняется тем, что во многих объектах область допустимых значений промежуточной координаты $y_{пр}$ ограничена. Указанные устройства могут реализовываться с помощью блоков ограничения сигналов системы «Старт» или элементов УСЭППА.

В ряде случаев для уменьшения инерционности АСР вспомогательный регулятор размещают вблизи от его исполнительного механизма. Это позволяет улучшить качество работы каскадной схемы, поскольку для эффективной работы каскадной АСР внутренний контур должен иметь существенно меньшую инерционность, чем внешний.

Определенные трудности возникают при наладке схем каскадного регулирования на объекте управления. При настройке схемы сначала включают внутренний контур системы — вспомогательный регулятор — и производят настройку его так же, как обычной одноконтурной системы. Затем включают и настраивают внешний контур — главный регулятор.

4.3. ПРИМЕНЕНИЕ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ В АСУТП

Применение пневмоэлектронных систем управления позволяет сочетать такие важные достоинства пневматических средств, как высокая надежность, взрыво- и пожаробезопасность, простота обслуживания, с возможностью быстрой обработки больших массивов информации и реализации сложных алгоритмов оптимизации с помощью ЭВМ.

Структурная схема пневмоэлектронной АСУТП приведена на рис. 4.11. Ввод сигналов от датчиков с пневматическим выходом в управляющий вычислительный комплекс (УВК) осуществляется после преобразования электрического сигнала в пневматический. Аналогичным образом должен осуществляться и вывод сигналов

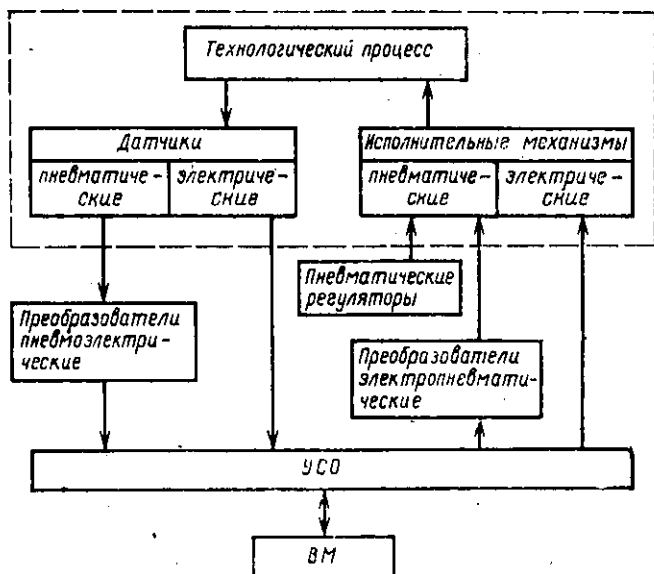


Рис. 4.11. Структурная схема пневмоэлектронной системы управления.

от УВК к пневматическим исполнительным механизмам (при реализации схем непосредственного цифрового управления) и к пневматическим регуляторам (при реализации супервизорного управления).

Для подобных целей используют индивидуальные или групповые преобразователи пневматических сигналов в электрические (п/э) и электрических в пневматические (э/п). Применение групповых преобразователей позволяет значительно уменьшить объем аппаратуры, используемой при реализации АСУТП, и в большинстве случаев оказывается дешевле, чем применение индивидуальных преобразователей. Основными недостатками таких систем обычно являются их сравнительно низкое быстродействие и довольно большие затраты машинного времени на ввод сигналов в УВК. Кроме того, при отказах групповых преобразователей в управляющий вычислительный комплекс не будет поступать информация от всей группы подключенных датчиков.

Использование индивидуальных преобразователей приводит к существенному увеличению объема аппаратуры в системе, что затрудняет ее обслуживание. Кро-

ме того, индивидуальные преобразователи в большинстве случаев имеют сравнительно невысокую точность, что требует применения специальных методов повышения метрологических характеристик преобразования.

Рассмотрим более подробно подсистему группового ввода — вывода пневматических сигналов в УВК, представляющую собой по существу программно-аппаратурный комплекс преобразования сигналов. Подсистема АСТРА-01 (агрегатная система технической реализации автоматики) предназначена для ввода в УВК сигналов от 116 пневматических датчиков, подсистема АСТРА-02 обеспечивает ввод 34 пневматических сигналов и вывод 32 пневматических сигналов. Обе подсистемы предназначены для работы с УВК типов СМ-1, СМ-2, Электроника-60. Время ввода информации при использовании подсистемы АСТРА-01 (116 пневматических датчиков) составляет 30—40 с; погрешность ввода и вывода сигналов равна 1,5—2%.

Преобразование пневматических сигналов в электрические в подсистеме АСТРА основано на методе развертки. Каждый датчик с пневматическим выходом подключают к индивидуальным элементам сравнения, имеющим электрический двухпозиционный выход. В течение одного цикла опроса датчиков все входные сигналы сравниваются с общим пилообразным сигналом развертки. Включение развертки происходит по сигналу от УВК. При совпадении сигнала развертки и измеряемого сигнала датчика на выходе соответствующего элемента сравнения появляется дискретный электрический сигнал, который через инициативный вход поступает к УВК. По времени срабатывания элемента сравнения от момента включения развертки в УВК рассчитывается действительное значение сигнала от данного датчика, которое заносится в память машины. Таким образом, в рассматриваемом случае сначала производится сопоставление величины пневматического сигнала времени задержки, а затем в ЭВМ время задержки преобразуется в цифровой код.

Для вывода пневматических сигналов от УВК к объекту управления в подсистеме АСТРА используют специальные пневматические интеграторы, которые управляются от УВК с помощью электропневмопреобразователей (дискретных), входящих в состав интеграторов. Интеграторы устанавливают индивидуально на

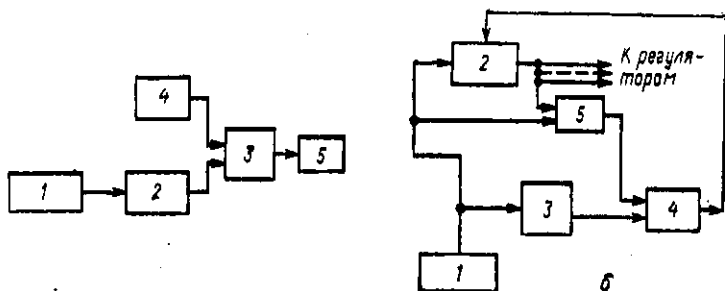


Рис. 4.12: Способы связи УВК с пневматическим регулятором, работающим в супервизорном режиме:

а — с индивидуальными преобразователями и обычными задатчиками: 1 — УВК; 2 — преобразователь; 3 — пневмореле; 4 — задатчик; 5 — регулятор; б — с применением дистанционно управляемых задатчиков: 1 — УВК; 2 — блок дистанционно управляемых задатчиков; 3 — преобразователь; 4 — элемент сравнения; 5 — коммутатор.

каждом выходном канале. Интеграторы включаются с помощью дискретных электропневмопреобразователей по команде от УВК. При этом время работы интегратора (время интегрирования) устанавливается пропорционально значению преобразуемого в пневматический сигнал электрического кода. Таким образом, пневматический сигнал на выходе интегратора равен цифровому электрическому сигналу, выводимому из УВК.

Подсистемы АСТРА-01 и АСТРА-02 выполнены по модульному принципу с возможностью замены однотипных модулей. Основные модули для повышения надежности имеют холодный резерв. Резервные модули включаются в работу по команде от ЭВМ при отказе работающих.

Схема изменения задания от УВК работающему в супервизорном режиме пневматическому регулятору для системы «Октан» приведена на рис. 4.12, а. На каждом контуре регулирования используют индивидуальные преобразователи э/п. Выходной электрический сигнал от УВК поступает на соответствующий преобразователь, пневматический сигнал от которого вводится в камеру задания регулятора. Коммутация преобразователей э/п осуществляется по выходному сигналу с помощью пневмореле. Когда регулятор не подключен к УВК, задание ему устанавливается с помощью пневмозадатчика.

В системе «Режим» для уменьшения объема используемой аппаратуры применяют другой способ изменения задания пневматическим регулятором от УВК. При

необходимости изменения задания одному из регуляторов (рис. 4.12,б) сигнал вызова 1 от УВК поступает на соответствующий вход дистанционно управляемых задатчиков 2 и через преобразователь э/п 3 — на вход элемента сравнения 4. Этот же сигнал вызова от УВК подается на коммутатор 5. В результате выходной сигнал от соответствующего задатчика через коммутатор 5 подключается ко второму входу элемента сравнения 4, где сравниваются задание от УВК и действительное задание от задатчика. Элемент сравнения в зависимости от знака рассогласования вырабатывает управляющий сигнал блоку задатчиков 2, изменяя задание соответствующему регулятору до тех пор, пока оно не станет равным заданию от УВК. Таким образом, в данной схеме один преобразователь э/п используется для всех контуров регулирования, подключенных к УВК.

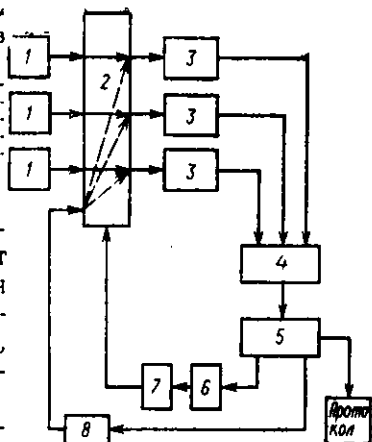
В некоторых случаях рассмотренную схему изменения задания регуляторам несколько видоизменяют для повышения ее точности. Так как погрешность этой схемы лимитируется разрешающей способностью элемента сравнения, то сравнение задания, выработанного УВК, с его действительным значением осуществляется в самой ЭВМ. На основании результатов этого сравнения машина рассчитывает длительность и знак включения двигателей блока дистанционно управляемых задатчиков.

Ввиду недостаточной точности индивидуальных аналоговых пневмоэлектронных преобразователей в ЦНИИКА был разработан программно-аппаратурный комплекс для ввода пневматических сигналов в УВК, обеспечивающий необходимую точность ввода сигнала. Структура комплекса представлена на рис. 4.13. Выходные пневматические сигналы от датчиков через пневмокоммутатор 2 подключены к индивидуальным пневмоэлектропреобразователям 3. Выходы преобразователей 3 через устройство связи с объектом 4 управляющего вычислительного комплекса (УВК) подключаются к процессору 5 УВК и заносятся в память УВК.

В режиме диагностики измерительных цепей система работает следующим образом. На соответствующем выходе модуля кодового управления 6 формируется логический сигнал «1», который через дискретный электропневмопреобразователь 7 переключает коммута-

Рис. 4.13. Структура системы ввода пневматических сигналов в УВК:

1 — пневматические датчики; 2 — коммутаторы; 3 — пневмоэлектропреобразователи; 4 — УСО; 5 — процессор; 6 — модуль кодового управления; 7 — дискретный электропневмопреобразователь; 8 — калибратор.



тор 2. При этом преобразователи 3 отключаются от датчиков 1 и подключаются к выходу программно управляемого калибратора 8, выдающего эталонный сигнал.

На каждом уровне проверки сигнала преобразователей ЭВМ производит ускоренный опрос и осреднение результатов измерения для каждого из каналов по данным ряда измерений. На основании полученных результатов проводят классификацию каналов измерения на годные и негодные. Результаты проверки выводят на печать; при этом протоколируются время проверки, уровни эталонных сигналов, номера отказавших каналов измерения и соответствующие погрешности.

Указанный комплекс успешно внедрен в составе АСУТП «Нефть». Результаты внедрения показали существенное улучшение метрологических характеристик системы за счет своевременного обнаружения и устранения отказов в измерительных цепях.

4.4. ПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ

Система управления «Автооператор»

Пневматическая система управления «Автооператор» предназначена для автоматизации различных химических реакторов. Это устройство осуществляет все необходимые операции пуска и останова оборудования, контроля и управления режимом работы реактора, аварийной защиты и т. д. При построении сложных иерархических систем управления с применением ЭВМ система «Автооператор» реализует функции подсистем нижнего уровня.

Основными функциями «Автооператора» являются: пуск и останов химического реактора; стабилизация

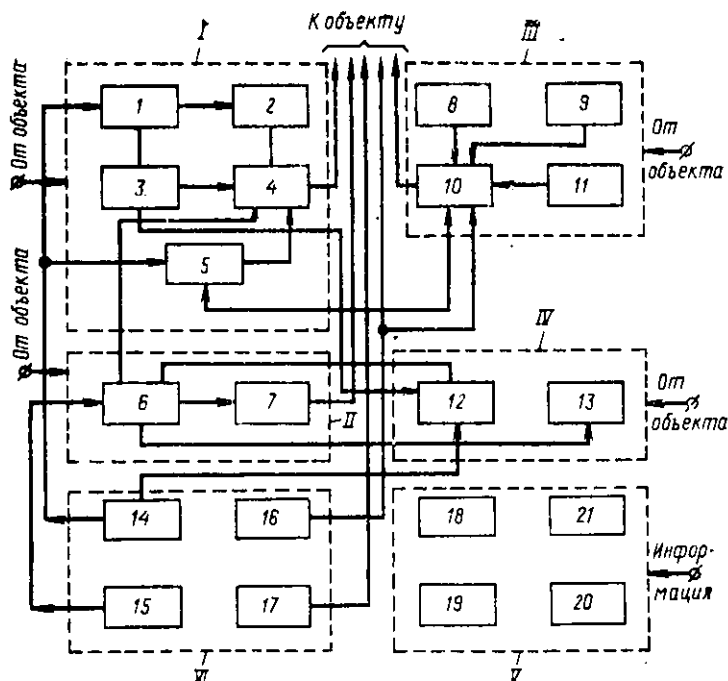


Рис. 4.14. Структурная схема управляющего устройства «Автооператор»:

I—VI — блоки: I — пуска и останова (узлы 1—5); II — стабилизации (узлы 6, 7); III — защиты (узлы 8—11); IV — логических и вычислительных операций (узлы 12, 13); V — информации (узлы 14—17); VI — панель управления (узлы 18—21); 1—21 узлы: 1 — разрешения на пуск; 2 — пуска по параметру; 3 — временных задержек; 4 — формирования выходного сигнала; 5 — останова; 6 — формирования задания; 7 — регуляторов; 8 — блокировки по параметру; 9 — защиты по максимальному значению; 10 — формирования управляющего сигнала; 11 — защиты по минимальному значению; 12 — программы изменения задания; 13 — логических модулей; 14 — управления пуском и остановом; 15 — управления регуляторами; 16 — управления аварийной защитой; 17 — дистанционного ручного управления; 18 — регистрирующих приборов; 19 — показывающих приборов; 20 — мнемосхемы; 21 — сигнализации положения регулирующих органов.

координат процесса; предупредительная блокировка оборудования; аварийная защита; логическое управление реактором; визуальный контроль, световая сигнализация и регистрация основных показателей процесса.

Структурная схема «Автооператора» приведена на рис. 4.14. В соответствии с его функциями она содержит блоки пуска и останова реактора, аварийной защиты, стабилизации координат процесса, логических операций, панели управления и информации.

Блок пуска и останова состоит из следующих узлов: разрешения на пуск реактора, останова реактора, временных задержек, пуска по параметру и формирования выходного сигнала. Пуск реактора осуществляется в соответствии с командным сигналом, поступающим от оператора с пульта управления. Пуск может быть автоматически приостановлен по команде с пульта управления или по сигналу от блока аварийной защиты. Выходной сигнал от блока пуска реактора поступает к исполнительным механизмам.

При необходимости произвести пуск реактора по определенной временной программе соответствующие сигналы от блока пуска вводятся в узел программного изменения задания блока логических операций. Команда на осуществление пуска по программе дается оператором с пульта управления.

Аварийная защита реактора осуществляется при превышении какой-либо координатой процесса максимального (минимального) допустимого значения. *Блок аварийной защиты* состоит из узлов защиты при превышении координатами процесса максимальных (минимальных) значений, блокировки по параметру и формирования управляющего сигнала, выход которого поступает к объекту и к блоку стабилизации переменных в реакторе. Работой блока аварийной защиты можно управлять также с панели управления.

Блок стабилизации координат процесса в реакторе состоит из узла формирования задания регуляторам и собственно регуляторов. Задание регуляторам формируется в зависимости от сигналов, поступающих от блока пуска и от блока логических операций (из узла программного изменения задания), а также может изменяться оператором с помощью специальных задатчиков, расположенных на панели управления. Панель позволяет оператору вмешиваться в ход процесса, включать или отключать отдельные узлы и схемы автоматизации.

С помощью модулей, входящих в *блок логических операций*, набираются различные схемы коррекции и логического управления технологическим процессом.

Панель информации включает мнемосхему, вторичные регистрирующие и показывающие приборы и устройства сигнализации положения исполнительных механизмов. На панель выводится световая сигнализация отклонений координат процесса от заданных значений.

«Автооператор» может работать с различными датчиками, имеющими стандартный выходной пневматический сигнал. Построен «Автооператор» по модульно-блочному принципу и содержит аналоговые и дискретные схемы. Каждый блок управляющего устройства состоит из нескольких различных модулей. Число и сочетание модулей, необходимые для реализации полной схемы управления, выбираются индивидуально для каждого из автоматизируемых реакторов.

Конструктивно «Автооператор» выполнен в виде пульта управления. Размеры устройства выбраны таким образом, что его можно монтировать в общем щите управления или отдельно от него. На вертикальной

панели расположены приборы контроля и регистрации и мнемосхема процесса с различными сигнализирующими табло. Наклонная панель управления служит для размещения органов настройки системы автоматизации и дистанционного ручного управления процессом.

Мнемосхема и панель управления «Автооператора» построены по мозаичному принципу, позволяющему учитывать индивидуальные особенности схем автоматизации различных химических реакторов и достаточно просто осуществлять изменения в системе управления, связанные с ее совершенствованием или с модернизацией объекта (технологического процесса).

Управляющие устройства типа «Автооператор» были достаточно успешно использованы при автоматизации химических реакторов в процессе полимеризации этилена при высоком давлении, в производстве полистирола.

Агрегатная система контроля и управления «Центр»

Агрегатный функционально-аппаратурный комплекс «Центр» является базой для построения автоматизированных систем управления непрерывными химико-технологическими процессами, оснащенных пневматическими исполнительными механизмами и первичными приборами, имеющими на выходе унифицированный пневматический сигнал. Система «Центр» состоит из функциональных блоков и устройств, собранных в отдельные шкафы и пульты. Каждый блок или устройство реализует определенную, сравнительно простую функцию в общей задаче централизованного контроля и управления технологическим процессом. Конструирование комплекса «Центр» из функциональных блоков делает систему управления более гибкой; позволяет легко модернизировать ее при изменении технологии процесса; допускает поэтапный ввод системы в промышленную эксплуатацию; упрощает ее наладку и обслуживание. Отдельные блоки системы состоят из пневматических модулей, реализованных на элементах УСЭППА.

Степень автоматизации операций сбора и переработки информации в системе «Центр» намного выше, чем в традиционных щитовых системах. Благодаря использованию принципа контроля по отклонениям оператору поступает информация не только о фактическом

состоянии технологического процесса, но и о степени соответствия этого состояния заданному; облегчается обнаружение выбегов координат; появляется возможность централизовать управление процессом и значительно сократить число традиционных щитов для размещения приборов.

Аппаратуру системы «Центр» целесообразно применять для управления объектами, которым свойственны: непрерывность технологического процесса; сравнительно небольшое число контролируемых координат (300—500) и исполнительных механизмов (80—200); оснащение пневматическими датчиками и исполнительными механизмами; компактность размещения технологического оборудования (датчики и исполнительные механизмы должны находиться на расстоянии не более 300 м от пунктов централизованного контроля и управления).

Перечислим функции, выполняемые системой «Центр»:

обнаружение, световая и звуковая сигнализация отклонений контролируемых координат от заданных значений и аварийная сигнализация с указанием места отклонения на мнемосхеме; измерение и индикация по вызову оператора абсолютных и заданных значений координат, а также относительных величин управляющих сигналов; периодическая регистрация и регистрация по вызову оператора текущих и заданных значений координат, а также их отклонений от нормы; первичная обработка сигналов от датчиков расхода (линеаризация шкалы); автоматическое одноконтурное и каскадное регулирование координат; дистанционное ручное управление исполнительными механизмами.

Структура системы «Центр» представлена на рис. 4.15. Информация о ходе технологического процесса поступает в систему от датчиков, которые должны иметь унифицированный выходной пневматический сигнал (в случае необходимости применяют преобразователи э/п). Сигналы от датчиков расхода с целью линеаризации проходят через блок корневых преобразователей 3. Размножение пневматических сигналов от датчиков к функциональным блокам осуществляется в кросс-шкафе 4 устройства непрерывного контроля 10. Это устройство содержит также вторичные аналоговые двухточечные регистрирующие приборы, с помощью которых оператор может проконтролировать динамику изменения каких-

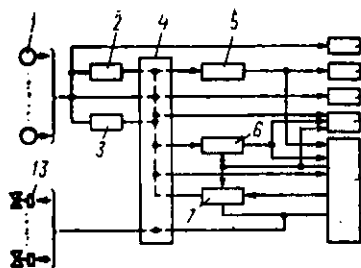


Рис. 4.15. Структура управляющего устройства «Центр»:

1 — датчики параметров; 2 — блок электропневмопреобразователей; 3 — блок корневых преобразователей; 4 — кросс-шкаф; 5, 6 — блоки обнаружения выбегов; 7 — блок регуляторов; 8 — блок непосредственного контроля; 9 — панель аварийной сигнализации; 10 — устройство непрерывного контроля; 11 — авторегистратор; 12 — пульт контроля и управления; 13 — регулирующие органы.

либо координат. Сигналы от датчиков через кросс-шкаф поступают к блокам обнаружения выбегов 5, 6 и блоку регуляторов 7, а также к пулту контроля и управления 12 и устройству цифровой регистрации 11.

В состав комплекса «Центр» входят блоки корневых преобразователей, обнаружения выбегов (отклонений координат), регулирующих устройств (регуляторов); пульт контроля и управления; устройства цифровой регистрации («Авторегистратор») и непрерывного контроля по вызову; кросс-шкаф (конструктивно входит в устройство непрерывного контроля); блок питания групповой пневматический; многошкальные показывающие приборы. Рассмотрим более подробно структуру и назначение отдельных блоков системы «Центр».

Блоки «Центра» выполнены в виде отдельных конструктивных единиц, поэтому наладка каждого блока производится автономно. Блоки состоят из модулей, выполняющих достаточно простые типовые функции (обнаружение отклонений, контроль вызова и т. д.) для определенного числа координат. Модуль служит в качестве ремонтной единицы в системе. Блоки имеют несколько модификаций, отличающихся обычно функциональным назначением. Число блоков и устройств различного функционального назначения, которые должны входить в данную систему управления, определяется числом координат объекта управления, задачами обработки сигналов и необходимым аппаратурным резервом, предусматриваемым в системе. Ниже кратко изложены функции, реализуемые отдельными блоками системы «Центр».

Блок *корневых преобразователей* (БКП-20) предназначен для линеаризации сигналов от датчиков расхода. Блок реализует операцию $P_{вых} = \sqrt{0,8(P_{вх} - 0,2) + 0,2}$, где $P_{вх}$, $P_{вых}$ — текущие значе-

ния входного и выходного пневматического сигнала в стандартном диапазоне изменения давления. Блок БКП-20 представляет собой набор из двадцати устройств типа ПФ1.17 системы «Старт», смонтированных в типовом шкафу комплекса «Центр». В каждое устройство вводится сигнал $P_{вх}$, а на выходе снимается давление $P_{вых}$, изменяющееся в интервале $(0,48-1)10^5$ Па. Корневые преобразователи имеют первый класс точности.

Блок обнаружения выбегов служит для обнаружения и сигнализации отклонений координат процесса. В системе «Центр» предусмотрены два рода технологической сигнализации (рис. 4.16). К первому относится световая и звуковая сигнализация при отклонении параметров от заданных значений за установленные допуски, независимо от номинального значения параметров. Сигнализация второго рода (в том числе аварийная) срабатывает при отклонении технологических координат выше или ниже предельных допустимых границ. Такими предельными границами могут быть и аварийные значения координат.

В соответствии с этим в системе «Центр» используют два различных блока обнаружения выбегов. Блок БОВ-202М служит для сигнализации первого рода. В блоке непрерывно автоматически сравнивается разница между действительным значением координаты P_d и ее номинальным (заданным) значением P_n и допустимыми верхними $P_{н.г}$ и нижними $P_{н.н}$ зонами отклонений: $P_{вых1}=1$ при $\Delta P_0 > P_{н.г}$ и $P_{вых1}=0$ при $\Delta P_1 < P_{н.г}$; $P_{вых2}=1$ при $\Delta P_n < P_{н.н}$ и $P_{вых2}=0$ при $\Delta P_n > P_{н.н}$, где $P_{вых1}$, $P_{вых2}$ — выходные сигналы блока $\Delta P_1 = P_d - P_n$, $\Delta P_2 = P_n - P_d$.

Допустимая зона ΔP_n и ΔP_n по каждой из контролируемых координат задается при наладке системы и автоматически смещается при изменении номинального значения P_n . В один блок БОВ-202М можно вводить до 20 координат, значения ΔP_n и ΔP_n могут варьироваться от 2 до 20%, основная погрешность блока составляет 1%.

Блок обнаружения выбегов БОВ-401 предназначен для осуществления технологической сигнализации второго рода. Блок включает 40 анализаторов. Каждый из них может быть настроен на сигнализацию отклонения координаты выше или ниже ее предельной верхней $P_{г.в}$ или нижней $P_{г.н}$ границы, т. е. реализует следующую

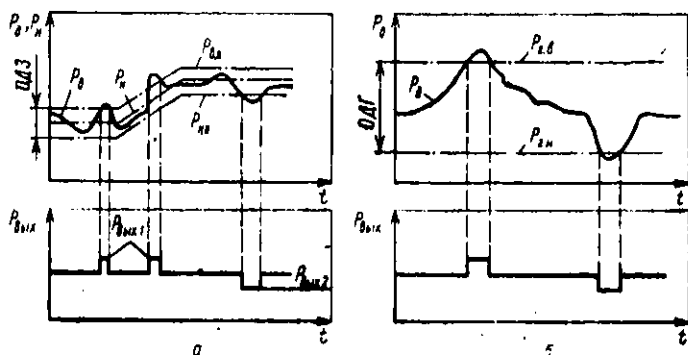


Рис. 4.16. Технологическая сигнализация первого (а) и второго (б) рода в системе «Центр».

операцию: $P_{\text{вых1}}=1$ при $P_d > P_{г.в}$ и $P_{\text{вых1}}=0$ при $P_d < P_{г.в}$ или $P_{\text{вых2}}=1$ при $P_d < P_{г.н}$ и $P_{\text{вых2}}=0$ при $P_d > P_{г.н}$. Таким образом, в блоке БОВ-401 сигнал от каждого датчика непрерывно автоматически сравнивается с одной из его предельных норм (границ). При обнаружении выбега координаты за верхнюю или нижнюю границу формируются сигналы «выбег вверх» или «выбег вниз». Если для какой-либо координаты необходимо сигнализировать выбеги вверх и вниз, используют два анализатора, один из которых настраивается для контроля за верхней границей, другой — за нижней. Основная допустимая погрешность блока составляет 1%, величину $P_{г.в} - P_{г.н}$ можно варьировать в интервале $(0,2 - 1,0) 10^5$ Па.

Выходные сигналы блоков — пневматические или электрические. В блоках предусмотрена возможность квитирования выходного сигнала оператором с помощью пневмокнопки, устанавливаемой на пульте управления.

Блок регулирующих устройств представляет собой набор пневматических регуляторов системы «Старт» с выходным сигналом в виде давления воздуха из диапазона $(0,2 - 1,0) 10^5$ Па, реализующих П- и ПИ-законы регулирования. Блок выпускают в семи модификациях, отличающихся числом возможных независимых контуров стабилизации (до 20) и законами регулирования (П или ПИ). Блоки регуляторов устанавливают обычно в машинном зале операторского помещения на расстоянии не более 30 м от пульта управления. Для малоинерционных объектов регуляторы могут размещаться около исполнительных механизмов в составе блока или индивидуально. В этом случае расстояние до пульта управления может достигать 300 м; для подключения регулятора к пульту прокладывают четыре или пять импульсных линий (см. раздел 4.1).

Устройства выбора режима работы АСР и установления задания регулятору, приборы контроля текущих и заданных значений регулируемой координаты и давления воздуха в линии к исполнительному механизму располагают обычно на пульте управления.

Пульт контроля и управления (ПКУ) имеется в любой из модификаций комплекса «Центр». Он является многоканальным устройством и предназначен для оперативного контроля, сигнализации отклонений и управления технологическим процессом. В системе предусмотрены две основные модификации пульта — ПКУ-1 и ПКУ-2, отличающиеся числом обслуживаемых информационных и регулирующих каналов. ПКУ-1 рассчитан на 60 каналов (в том числе 30 — для связи с регуляторами) и оборудован электрической сигнализацией отклонений, поэтому его нельзя устанавливать во взрывоопасных и пожароопасных помещениях. Пульт ПКУ-2 имеет 40 каналов (в том числе 20 — для связи с регуляторами), оборудован пневматическими сигнализаторами, является чисто пневматическим устройством и может быть установлен во взрыво- и пожароопасных помещениях.

Для системы «Центр» характерно совмещение органов управления, установленных на пульте, с мнемосхемой технологического процесса, нанесенной на передней панели пульта, а также совмещение операций управления и вызова. Благодаря этому при выполнении любой операции управления осуществляется одновременный вызов на показывающие приборы всех переменных, необходимых для принятия оператором того или иного решения: текущего значения координаты, задания, сигнала о положении исполнительного механизма. Как показывает практика использования системы «Центр»,

такое совмещение сенсорного и моторного полей на пульте управления заметно упрощает процесс принятия оператором решений по управлению объектом.

Пульт управления системы «Центр» выполнен по мозаичному принципу: мнемосхема технологического процесса вместе с встроенными в нее органами управления набирается из отдельных ячеек, входящих в комплект пульта. Ячейки — это съемные и конструктивно законченные взаимозаменяемые элементы различного функционального назначения, например ячейки с ручным задатчиком, с сигнальными лампами, с графическими символами технологических аппаратов и их коммуникаций, и т. п.

Устройство цифровой регистрации «Авторегистратор» предназначено для централизованной регистрации относительных значений технологических координат, представленных в виде унифицированных пневматических сигналов. В случае необходимости «Авторегистратор» обеспечивает вывод сигналов на перфоленту, а также регистрацию номинальных значений координат. При регистрации на бланк выводится текущее время в часах и минутах, а также текущее и заданное значения координаты. Регистрация осуществляется в цифровой форме с погрешностью до 1%.

Все узлы «Авторегистратора» выполнены на пневматических элементах УСЭППА.

Устройство непрерывного контроля координат и кросс-шкаф предназначены для выполнения ряда вспомогательных функций — размножения и усиления по мощности входных сигналов, отключения блоков системы «Центр» от датчиков на время их проверки и наладки, контроля текущих значений координат по вызову оператора. Для контроля текущих значений координат используют аналоговые двухточечные приборы, что позволяет по результатам регистрации анализировать динамику процесса.

Имеется две модификации устройства непрерывного контроля: УНК-1 и УНК-2. Первое обеспечивает возможность подключения 50 сигналов от датчиков и 50 управляющих сигналов на исполнительные механизмы. Это устройство позволяет осуществить одновременный контроль до 12 пневматических сигналов. В устройство УНК-2 вводится такое же число сигналов, при этом имеется возможность одновременного контроля и регистрации до 4 пневматических и 12 электрических сигналов.

Групповой блок питания предназначен для обеспечения сжатым воздухом блоков комплекса «Центр». Блок включает набор стабилизаторов давления и фильтров воздуха. Имеется две модификации блоков питания — на 10 рабочих линий (одна резервная) и на 20 рабочих линий (две резервные).

По сравнению с традиционными щитовыми системами управления комплекс «Центр» имеет следующие основные технико-экономические преимущества: меньше (в 4—5 раз) площадь центральных пунктов управления; существенно (в 4—5 раз) меньше число вторичных показывающих и регистрирующих приборов (что повышает надежность системы в целом и уменьшает затраты на эксплуатацию аппаратуры); выше эффективность управления процессом — вследствие лучшей организации пода-

чи информации оператору, автоматического определения нарушений в ходе процесса и освобождения оператора от трудоемкой работы по контролю и регистрации координат (при этом в освободившееся время оператор может быть занят решением задач управления более высокого уровня — настройкой технологического процесса на требуемое качество продукта, оптимизацией режима и т. п.). Блочно-модульный принцип построения комплекса позволяет легко вносить необходимые изменения в систему управления при модернизации технологического процесса.

Агрегатный пневматический комплекс «Режим»

Комплекс «Режим», предназначенный для автоматизации непрерывных химических и нефтехимических производств, реализует следующие основные функции: контроль и аналоговую регистрацию по вызову оператора координат процесса и их заданных значений в абсолютных (физических) единицах; контроль по вызову оператора значений управляющих сигналов в относительных единицах (0—100%); непрерывную аналоговую регистрацию важнейших координат; автоматическое обнаружение и сигнализацию на мнемосхеме технологического процесса предельных и аварийных отклонений координат от их заданных значений; автоматическое одноконтурное и каскадное регулирование; дистанционное управление исполнительными механизмами; супервизорный режим работы регуляторов по командам от УВК. Структура комплекса средств «Режим» приведена на рис. 4.17. Сигналы от датчиков объекта управления поступают к блокам регуляторов 1, обнаружения выбегов 2 и коммутатору 3. В блок 1 входит до 24 ПИ-регуляторов системы «Старт».

Заданные значения номиналов «Н» для блока регуляторов устанавливает оператор с помощью блока автоматически управляемых задатчиков 4. Он задает режим работы регуляторов — автоматический, ручной или супервизорный (по команде от УВК); выбор режима производится с помощью кнопок 5, причем режим запоминается в блоке памяти 6. Выбор режима работы регуляторов осуществляется оператором после вызова соответствующего агрегата технологической схемы с помощью кнопок 7 и регулируемой координаты (кнопками 8). При этом через коммутатор 9 кнопки 5 подклю-

индикаторы 16. Кроме того, в системе «Режим» предусмотрена обобщенная сигнализация отклонения координат какого-либо технологического агрегата от граничных значений. Формирование обобщенного сигнала об отклонениях в данном агрегате осуществляется с помощью блока общей сигнализации 17; сам сигнал выводится на индикатор 18.

Блок 19 используют при каскадном регулировании каких-либо координат технологической схемы. Этот блок обеспечивает перевод системы в режим каскадного регулирования, в режим одноконтурной стабилизации главной и вспомогательной переменных или в режим одноконтурной стабилизации одной из этих переменных.

Конструктивно комплекс технических средств «Режим» представляет собой операторскую и функциональную стойки.

Операторская стойка обычно расположена в помещении центрального пункта управления и предназначена для размещения сенсорно-моторных полей. На этой стойке находятся вторичные показывающие и регистрирующие приборы, мнемосхема со встроенными индикаторами отклонения координат и кнопками вызова координат. Здесь же устанавливают органы дистанционного управления задатчиками. Функциональную стойку устанавливают в машинном зале пункта управления, она содержит различные логические, вычислительные и регулирующие блоки.

Число операторских и функциональных стоек выбирают индивидуально для каждого объекта управления, в зависимости от числа контролируемых координат и числа контуров регулирования. Одна операторская стойка может работать с несколькими (до 10) функциональными стойками. Число контролируемых переменных, обслуживаемых одной стойкой, равно 60, число контуров регулирования — 24. Одна операторская стойка обеспечивает непрерывную регистрацию 12 переменных и сигнализацию отклонений 48 координат. Входные и выходные сигналы комплекса «Режим» изменяются в стандартном диапазоне давлений.

Применение комплекса «Режим» позволяет существенно сократить размеры помещения центрального пункта управления, уменьшить число используемых традиционных приборов, сократить сроки проведения и стоимость проектных работ и уменьшить объем монтажно-

наладочных работ непосредственно на объекте за счёт наладки системы в условиях завода-изготовителя.

Пневматические системы для управления дискретными процессами

Пневматический комплекс «Центр — Логика» является модификацией системы «Центр». Этот комплекс предназначен для построения систем управления периодическими технологическими процессами, которые до настоящего времени широко распространены в химической промышленности. Комплекс позволяет управлять достаточно инерционными процессами, с повторяющимися технологическими циклами работы. Его успешно используют для управления большим числом параллельно работающих, как правило однотипных, агрегатов периодического действия.

Комплекс «Центр — Логика» реализует следующие функции: автоматическое выполнение заданной программы ведения технологического процесса; пооперационное управление переходами к различным программам технологического цикла по команде от оператора; индикацию номера выполняемой в данный момент операции; контроль по вызову аналоговых координат процесса и положения двухпозиционных исполнительных механизмов; регистрацию аналоговых координат; аварийную сигнализацию об отклонениях координат процесса; сигнализацию неисправности двухпозиционных исполнительных механизмов и блокировку их неправильных переключений; дистанционное управление исполнительными механизмами.

Комплекс «Центр — Логика» построен по блочно-модульному принципу и включает ряд блоков, каждый из которых реализует определенную функцию. Всего в комплекс входит 11 типов различных блоков. Все их можно условно разделить на две группы: функциональные — для обработки информации и блоки оперативно-диспетчерского оборудования.

В первую группу входят блоки операций, обнаружения отклонений (аналоговый и дискретный), памяти (дискретный), режимов для запоминания команд, преобразователей. Ко второй группе относятся блоки контроля для регистрации аналоговых сигналов, сигнализации, местного управления, а также пульта контроля и управления.

Рассмотрим кратко основные характеристики и назначение отдельных блоков комплекса «Центр — Логика».

Блоки операций. В составе комплекса имеются две модификации этих блоков. Первый (блок Б5.1.1) осуществляет формирование программ для процессов, в которых общее число технологических операций не более 36, второй (Б5.1.2) состоит из двух суб-блоков, каждый может реализовывать до 10 операций.

Блоки операций формируют управляющие сигналы к двухпозиционным исполнительным механизмам; формируют дискретные сигналы об отсчете заданных интервалов времени для каждой из технологических операций и выдают номер этой операции; коммутируют в соответствии с программой управления задание для блоков обнаружения аналоговых отклонений; вырабатывают управляющие сигналы блокам сигнализации; реализуют универсальные логические функции.

Каждый блок состоит из ряда модулей, позволяющих осуществить переход от одной технологической операции к другой через заданный интервал времени или по достижении какими-либо координатами заданных значений.

Блок обнаружения отклонений (аналоговый) предназначен для контроля отклонения аналоговых сигналов от заданных границ. Число контролируемых с помощью этого блока сигналов равно 20. Блок формирует аварийные сигналы отклонений по каждой из контролируемых координат, а также для группы технологических сигналов. Индивидуальная сигнализация осуществляется в двух случаях — если координата в стационарном режиме превысила заданное значение или если координата за известное контрольное время не достигла номинального значения. Обобщенный аварийный сигнал выдается в том случае, когда превышено предельное значение хотя бы одной координаты данной группы. Кроме того, блок обеспечивает групповую сигнализацию о том, что все координаты данной группы находятся в определенных границах.

Блок обнаружения отклонений (дискретный) служит для контроля отклонений дискретных сигналов от заданных границ. С помощью этого блока контролируют правильность положения двухпозиционных исполнительных механизмов и время протекания технологических операций по дискретным пневматическим сигналам, поступающим от блока операций. Кроме того, с помощью рассматриваемого блока формируются сигналы превышения каким-либо дискретным сигналом предельных значений, несоответствия положения исполнительных механизмов, подаваемых к ним сигналам, а также осуществляется обобщенная сигнализация для группы технологических координат. Блок включает модули анализаторов и пневматических реле, работающих по схеме И.

Блок режимов для запоминания команд предназначен для формирования сигналов задания режимов технологического процесса. Этот блок используют в многоканальных системах, когда один блок операций обслуживает несколько технологических линий. Всего к блоку можно подключать до четырех линий.

Блок памяти дискретный запоминает сигналы, поступающие от пульта управления к двухпозиционным исполнительным механизмам. Блок используют в многоканальных системах управления. Общес

число запоминаемых сигналов достигает 20. Сигналы запоминаются на время, когда пульт контроля и управления отключен от управления данной технологической линией.

Блок преобразователей выполняет преобразование до 200 пневматических дискретных сигналов в электрические, а также до 80 дискретных электрических сигналов — в пневматические. Кроме того, блок содержит пневматические реле, осуществляющие универсальные логические функции.

Блок контроля для регистрации аналоговых сигналов выполняет регистрацию до двенадцати пневматических аналоговых сигналов.

Пульты контроля и управления являются рабочим местом оператора-технолога и представляют собой многоканальные устройства, так как с одного пульта можно управлять несколькими технологическими линиями; контролировать ход технологического процесса, задавать и изменять режимы работы оборудования, осуществлять дистанционное управление. В состав пульта входит многошкальный пневматический показывающий прибор, с помощью которого ведется контроль по вызову аналоговых координат и показывается номер протекающей в данный момент технологической операции. На пульте размещена мозаичная мнемосхема процесса, которую набирают из унифицированных ячеек. В мнемосхему входят ячейки с гнездом вызова координат, с ручным задатчиком, различными переключателями, сигнальными лампами и т. д. Это позволяет набирать мнемосхему вместе с смонтированными в нее устройствами контроля и управления технологическим процессом.

В состав комплекса «Центр—Логика» входит пульт контроля и управления трех модификаций. Все они имеют одинаковый набор функциональных модулей и различаются между собой лишь числом устройств контроля и управления на одном пульте. Предельное число их таково: 20 переключателей, 30 задатчиков (из них 20 для установки номинального значения координат и 10 для ручного дистанционного управления исполнительными механизмами); 35 гнезд вызова координат; 20 пневмокнопок; 30 следящих переключателей; 90 сигнальных электрических ламп.

Блок сигнализации состояния технологического процесса и режимов работы отдельных агрегатов, а также общей аварийной сигнализации по объекту управления конструктивно представляет собой специальный шкаф, на передней панели которого набрана с помощью мозаичных ячеек обобщенная мнемосхема технологического процесса с сигнальными лампами. Пневматические сигналы формируются в блоках операций или режимов, преобразуются в электрические сигналы и выводятся на блок. Максимальное число точек сигнализации — 50.

Блок местного управления предназначен для контроля и управления десятью пневматическими двухпозиционными исполнительными механизмами. Блок обеспечивает для каждого контура регулирования передачу команд от устройств управления к исполнительному механизму, ручное дистанционное управление, индикацию положения исполнительного механизма и сигнализацию соответствия этого положения сигналу команды. Передняя панель блока выполняется обычно в виде мозаичной мнемосхемы технологического процесса или отдельного агрегата. На этой же мнемосхеме монтируют сигнализаторы, переключатели и устройства дистанционного управления положением исполнительных механизмов.

Комплекс «Центр — Логика» обеспечивает возможность реализации нескольких вариантов технической структуры систем управления. При этом устройства управления могут быть одноканальными или многоканальными, т. е. обслуживать один или несколько технологических агрегатов.

Одноканальные устройства программного и дистанционного управления используют в случае разнотипных технологических объектов, с различными программами проведения технологических процессов. При этом для каждого из параллельно работающих агрегатов требуются индивидуальное программное устройство и индивидуальный пульт контроля и управления. Иногда используют упрощенную структуру системы, т. е. индивидуальные устройства программного управления для каждого технологического агрегата и общий пульт контроля и управления. При этом удается существенно сократить объем контролирующей и управляющей аппаратуры (благодаря использованию только одного пульта), однако надежность системы в целом, а также ее быстродействие при переходе на ручное дистанционное управление снижаются.

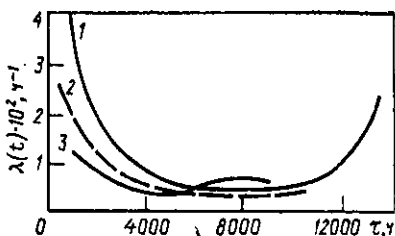
Многоканальные устройства программного и дистанционного управления применяют в том случае, когда управление каждым агрегатом выполняется поочередно и не требуется высокая оперативность перехода на ручное дистанционное управление.

Опыт применения пневматических систем управления в промышленности

В настоящее время в химической и смежных с ней отраслях промышленности успешно эксплуатируют пневматические системы управления. Так, система типа «Центр» работает в составе АСУ «Нефть». С помощью этого комплекса осуществлена автоматизация производств каталитического реформинга, бутиловых спиртов, депарафинизации, подготовки и первичной переработки нефти, адсорбционной очистки масел и др. Применение системы «Центр» позволило отказаться от традиционных щитов для размещения приборов, сократить численность обслуживающего персонала, повысить производительность труда и эффективность проведения технологических процессов.

Рис. 4.18. Интенсивности отказов для различных систем пневмоавтоматики:

1 — Пуск-3; 2 — Авторегистратор системы «Центр»; 3 — Пуск ЗС; 1, 2 — стендовые испытания; 3 — промышленные испытания.



На многих производствах установлены комплексы «Режим», позволяющие строить пневмоэлектронные системы управления с пневматическими регуляторами, работающими в супервизорном режиме. Благодаря установке комплекса «Режим» существенно сократились затраты на проектирование систем управления, уменьшилась протяженность импульсных трасс в операторском помещении, упростился монтаж, наладка и освоение систем автоматизации.

Для управления периодическими процессами успешно используют комплекс «Центр — Логика», позволяющий реализовать сложные программы переключения управляющих органов и изменять режимы работы установки по заданной программе.

Эффективность работы указанных систем во многом определяется их достаточно высокой надежностью, которая зависит в первую очередь от характеристик элементов, составляющих систему. Некоторые сведения по надежности пневматических элементов приведены в гл. 3. Полные данные о надежности всех пневмоэлементов и зависимости их работы от характера нагрузки при различных вариантах включения в систему автоматизации в настоящее время отсутствуют. Поэтому при анализе надежности пневматических систем управления необходимо провести сбор и обработку данных об их отказах в процессе эксплуатации.

Некоторые результаты выполненных в ЦНИИКА стендовых испытаний различных систем пневмоавтоматики приведены на рис. 4.18. Как видно из рисунка, для всех рассмотренных систем характерна типичная кривая интенсивности отказов. Начальный период приработки составляет примерно 2500 ч. Следует отметить, что испытания проводились до модернизации элементной базы, в настоящее время надежность систем существенно улучшена. Отказы были связаны в основном с

невысокой надежностью аналоговых пневмоэлементов, которые до модернизации имели сравнительно нестабильные метрологические характеристики.

Показатели надежности системы «Пуск» («Центр») даже до модернизации элементов оказались близки к соответствующим характеристикам электронных информационных систем. Результаты стендовых испытаний системы «Пуск» оказались хуже, чем итоги контрольной эксплуатации в промышленных условиях. Этот факт характерен и для ряда других пневматических систем и связан с выбором понятия отказа. Выход того или иного узла системы из класса точности, принимаемый за отказ при стендовых испытаниях, в промышленных условиях часто не приводит к заметным ухудшениям в технологическом процессе и поэтому остается незамеченным.

Сложные пневматические системы построены таким образом, что в случае отказа какого-либо узла оператору поступает немедленная информация об этом, что позволяет резко сократить продолжительность поиска неисправности и ускорить восстановление системы.

1. ПЕРЕЧЕНЬ СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМЫХ СРЕДСТВ
ПНЕВМОАВТОМАТИКИ

Устройство	Шифр	Назначение
Приборы системы «Старт»		
Устройство позиционное регулирующее	ПР1.5	Двухпозиционное регулирование
Устройство позиционное регулирующее с мастраниваемой зоной возврата	ПР1.6	То же
Устройство пропорциональное регулирующее	ПР2.8	П-регулятор непрерывного действия (со статической ошибкой)
Устройство пропорционально-интегральное регулирующее	ПР3.31	ПИ-регулятор непрерывного действия
Устройство пропорционально-интегральное регулирующее с местным задатчиком	ПР3.32	То же
Устройство регулирующее соотношение, пропорционально-интегральное	ПР3.33	ПИ-регулятор непрерывного действия — для стабилизации двух координат
Устройство пропорционально-интегральное, регулирующее соотношение, с коррекцией по третьему параметру	ПР3.34	ПИ-регулятор непрерывного действия — для стабилизации соотношения двух координат пропорционально третьему параметру
Устройство регулирующее пропорционально-интегрально-дифференциальное	ПР3.35	ПИД-регулятор непрерывного действия
Устройство прямого предварения	ПФ2.1	Для построения ПД- и ПИД-регуляторов
Устройство обратного предварения	ПФ3.1	Используется совместно с П- или ПИ-регуляторами для улучшения характеристик АСР
Устройство алгебраического суммирования	ПФ1.1	Алгебраическое сложение трех сигналов; умножение на 2 одного или деление на 2 одного или суммы двух сигналов
Устройство извлечения квадратного корня	ПФ1.17	Извлечение квадратного корня из сигнала; контроль и регулирование расхода
Множительно-делительное устройство	ПФ1.18	Перемножение двух сигналов и деление их произведения на третий; для построения вычислительных устройств

Устройство	Шифр	Назначение
Умножитель на постоянный	ПФ1.3.9	Реализует операцию $P_{\text{вых}} = k(P_{\text{вх}} - 0,2) + 0,2$; в вычислительных устройствах, в схемах регулирования соотношения
Ускоритель телесигналов	ПФ2.5	Ускорение передачи дискретных сигналов от источника до приемника
Прибор селектирования большего или меньшего сигнала	ПФ4/5.1	Сравнение двух сигналов и выдача большего (меньшего) из них; в схемах аварийной сигнализации и защиты
Усилитель мощности	ПП1.5	Усиление мощности непрерывного сигнала; передача пневмосигналов в длинных линиях в АСР
Реле переключения	ПП2.5	Коммутация двух непрерывных сигналов подключением к выходу одного или другого по команде «0» или «1»; в АСР при установке регулятора отдельно от вторичного прибора
Прибор ограничения сигналов	ПП11.1	Ограничение по максимуму (минимуму) входного сигнала, в схемах каскадного регулирования
Показывающий прибор с сигнальным устройством	ПВ2.2	В схемах контроля для показания одной непрерывной координаты и сигнализации о выходе ее за верхнюю или нижнюю границу
Показывающий прибор со станцией управления	ПВ3.2	В АСР для установки на нем регулятора, управления режимами работы системы (автоматический, программный, ручной), контроля регулируемой координаты, задания и положения исполнительного механизма
Самopiшущий прибор	ПВ4.4П	Непрерывная регистрация на одной диаграмме трех сигналов и показания их на трех шкалах
То же	ПВ4.4Э	То же, что ПВ4.4П, но только во взрыво- и пожаробезопасных помещениях

Устройство	Шифр	Назначение
Самопишущий прибор со станцией управления	ПВ10.1П	Используется в АСР для установки на нем регулятора, управления режимами работы системы (автоматический, программный, ручной); непрерывная регистрация и показание регулируемой координаты, задания, положения исполнительного механизма
То же	ПВ10.2П	То же, что ПВ10.1П, с возможностью регистрации еще одной координаты
То же	ПВ10.1Э	То же, что ПВ10.1П, но только во взрыво- и пожаро-безопасных помещениях
То же	ПВ10.2Э	То же, что ПВ10.1Э, с возможностью регистрации еще одной координаты

Приборы, не входящие в систему «Старт»

Прибор контроля интегрирующий	ПИК1	Непрерывное интегрирование и показание значений расхода за какой-либо промежуток времени
Приборы контроля	ПК1 ПК2 ПК3	В схемах контроля для показаний одного (ПК1), двух (ПК2) или трех (ПК3) параметров
Самопишущие приборы	ПК1.1 ПК2.2 ПК3.3	В схемах контроля для регистрации одного (ПК1.1), двух (ПК2.2) или трех (ПК3.3) параметров

Элементы непрерывной техники УСЭППА

Пневмосопротивление нерегулируемое	П2Д4	Нерегулируемый дроссель
Пневмосопротивление регулируемое	П2Д2М	Регулируемый дроссель
Пневмоповторитель	П2П.1	Формирование маломощного выходного сигнала, равного входному (по давлению); для развязки пневматических цепей
Повторитель со сдвигом	П2П.2	Формирование выходного сигнала, отличающегося (по давлению) от входного на постоянную величину

Устройство	Шифр	Назначение
Пневмоповторитель с мощным выходом (точный)	П2П.7	Повторение входного сигнала давления с одновременным усилением его по мощности (класс—0,5)
Пневмоповторитель—усилитель мощности (грубый)	П2П.3	То же, что П2П.7, но класс точности не нормируется
Задатчик управления	П23Д.3	Ручная установка заданного давления с маломощным выходом
Задатчик управления мощный	П23Д.4	То же, что П23Д.3, но с мощным выходом
Элемент сравнения трехмембранный	П2ЭС.3	Сравнение двух непрерывных координат и формирование на выходе сигнала «0» или «1»
Элемент сравнения пятимембранный	П2ЭС.1	Сравнение четырех непрерывных координат и формирование на выходе сигнала «0» или «1»; алгебраическое суммирование трех сигналов
Пневмоемкость	ПОЕ.50	Построение апериодических звеньев

Элементы дискретной техники УСЭППА

Реле трехмембранное	П1Р.1	Выполнение логических операций с дискретными сигналами; один вход постоянный (подпор); другой — дискретный («0» или «1»)
Реле трехмембранное	П1Р.3	То же, что реле П1Р.1; оба входа — дискретные переменные
Клапан одноконтатный	ПЗК.1	Коммутация непрерывных и дискретных сигналов
Клапан «ИЛИ»	ПЗК.5	Выполнение операции ИЛИ для двух переменных
Преобразователь пневмо-электрический	П1ПР.4	Преобразование дискретного пневматического сигнала в дискретный электрический
Преобразователь электро-пневматический	П1ПР.5	Преобразование дискретного электрического сигнала в дискретный пневматический
Пневмотумблер	П1Т2	Ручное включение командных дискретных сигналов
Пневмокнопка	П1КН.3	Ручное включение кратковременной подачи пневматического сигнала в схему
Вентиль	ПОВ.1	Ручное замыкание и размыкание мощной пневмолinii

Устройство	Шифр	Назначение
Реле универсальное	РУП-1М	Выполнение элементарных логических и счетных операций с дискретным сигналом
Клапан обратный	ПЗОК.1	Пропускание сигнала только в одном направлении
Выключатель конечный	П1ВК.1	Формирование на выходе дискретного сигнала при механическом воздействии на шток
Реле выключающее	П-1108	Включение и выключение пневматических устройств при подаче команды
Сигнализатор мембранный	СМ-1	Преобразование дискретных пневматических сигналов в дискретные электрические

Системы пневмоавтоматики

Установка централизованного программного регулирования и дистанционного управления	ПУСК-З	Автоматическое регулирование процесса тепловлажностной обработки железобетонных изделий
Система централизованного контроля и управления	ПУСК-ЗД	Управление процессами сушки древесины в сушильных камерах
Установка автоматическая управляющая	КОРД	Управление периодическими процессами. Реализована на одноканальных устройствах программного и ручного дистанционного управления
Агрегатный функционально-аппаратурный комплекс	ЦЕНТР	Построение АСУ непрерывными технологическими процессами. Контроль координат процесса, сигнализация отклонений, стабилизация, программное управление, линеаризация сигналов от датчиков расхода, цифровая и аналоговая регистрация координат
Агрегатный функционально-аппаратурный комплекс	ЦЕНТР—ЛОГИКА	Построение пневматических АСУ периодическими технологическими процессами или параллельно работающими однотипными агрегатами. Работа объекта по заданной программе, контроль, регистрация координат, сигнализация о нарушениях процесса

Устройство	Шифр	Назначение
Приборы связи с ЭВМ		
Электропневматический преобразователь	КЭПП-2М	Преобразование электрического параллельного кода в пневматический аналоговый сигнал
Коммутатор пневматических сигналов с памятью	ПКП-2М	Коммутация выходного сигнала с КЭПП-2М с запоминанием давления между обращениями ЭВМ
Коммутатор пневматических сигналов	ПК-3	Коммутация пневматических сигналов на входе коммутатора, управляемого ЭВМ

2. СИСТЕМА ПИТАНИЯ СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Надежность работы устройств пневмоавтоматики существенно зависит от качества сжатого воздуха, предназначенного для питания приборов и регуляторов. Система подготовки сжатого воздуха представлена на рис. П.1. В нее входят фильтр 1 воздуха, подаваемого на сжатие в компрессоры 2, холодильник 3, приемники (ресиверы) 4, маслоотделитель 5, система осушки воздуха 6, регулятор давления 7, обратные клапаны 8. В некоторых особо ответственных случаях устанавливают аварийный компрессор 9, который автоматически включается в работу при падении давления в системе ниже допустимого.

Для сжатия воздуха до давления $(5-7) \cdot 10^5$ Па обычно применяют поршневые или мембранные компрессоры. Производительность компрессорной станции определяют по максимально возможному расходу воздуха для питания всех пневматических устройств с учетом потерь его в системе. Число компрессоров находят с учетом длительности их работы (около 30—45 минут в час), производительности и необходимого числа запасных машин. Одновременно определяют и объем ресивера, который должен быть выбран так, чтобы

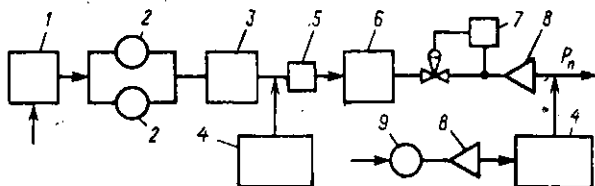


Рис. П. 1. Система подготовки сжатого воздуха:

1 — фильтр; 2 — компрессоры; 3 — холодильник; 4 — ресиверы; 5 — маслоотделитель; 6 — узел осушки воздуха; 7 — регулятор давления воздуха; 8 — обратные клапаны; 9 — аварийный компрессор.

обеспечить потребности в воздухе за время останова компрессора на охлаждение.

Воздух, применяемый для питания приборов, очищают от пыли, масла и осушают. Для понижения влажности воздуха после компрессоров устанавливают специальные холодильники, в которых сжатый воздух охлаждается, содержащаяся в нем влага конденсируется и выводится из системы. Силикагелевая осушительная установка состоит из двух адсорбционных колонн, электрического нагревателя и двух кранов-переключателей потоков воздуха. Адсорберы используют попеременно: когда один из них работает в режиме осушки, другой находится на регенерации. Длительность одного цикла работы установок составляет примерно восемь часов, после чего рабочий адсорбер с помощью кранов переключают на регенерацию, а осушаемый воздух подают в колонну с регенерированным силикагелем.

Питание приборов осуществляется воздухом давлением (1,4—0,14)¹⁰ Па. Для стабилизации давления применяют регуляторы и специальные редукторы, представляющие собой П-регуляторы прямого действия.

3. ВСТРОЕННЫЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Регуляторы монтируют в корпусах вторичных приборов (мостов, потенциометров, самопишущих манометров). Входным сигналом регулятора является перемещение $e(t)$ некоторого рычага или тяги прибора, пропорциональное рассогласованию между регулируемой координатой и заданием. Встроенные регуляторы работают по принципу сравнения перемещений, поэтому их точность и чувствительность ниже, чем у соответствующих устройств, базирующихся на принципе компенсации сил. В промышленности достаточно широко применяют встроенные ПИ-регуляторы типа 04 (они не вошли в ГСП) и ПИД-регуляторы ПРЗ.27М системы «Старт».

Пневматический регулятор типа 04

Принципиальная схема регулятора приведена на рис. П.2, а. Он предназначен для поддержания выходной координаты y объекта I , равной заданной величине y_z . Сигнал $e = y - y_z$ поступает из измерительного прибора II на вход усилителя давления III , а затем проходит в усилитель мощности IV . Выходной сигнал $P_{вых}$ подается на исполнительный механизм и устройства отрицательной и положительной обратной связи V .

Регулятор работает следующим образом. Пусть в некоторый момент времени значение y стало больше y_z . Разность e , получаемая на механическом сумматоре прибора II , преобразуется в пропорциональное перемещение h тяги I (например, вниз). Трехплечий рычаг-сумматор 2 будет поворачиваться вокруг оси 3 в направлении часовой стрелки, поэтому заслонка 4 станет приближаться к соглу 5 . Давление воздуха в камере 6 возрастает, сильфон 7 начнет перемещаться вниз, и заслонка 9 усилителя мощности станет удаляться от сопла 8 , к которому подведено питание давлением P_n . Расход воздуха через сопло увеличится, и давление $P_{вых}$ в камере 10 будет возрастать до тех пор, пока не сравняется с давлением над сильфоном. Однако расход воздуха через сопло 8 во много раз больше, чем через сопло 5 .

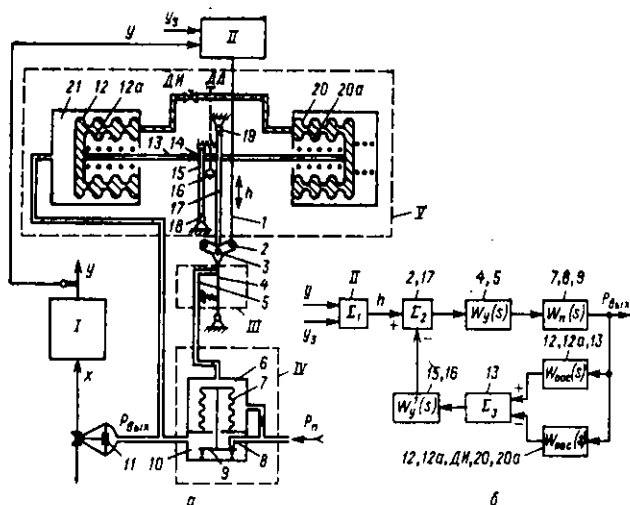


Рис. П. 2. Регулятор типа 04:

а — принципиальная схема; б — структурная схема; 1 — объект; 11 — измерительный прибор; 111 — преобразователь; IV — усилитель мощности; V — устройство обратной связи; 1 — тяга; 2 — трехплечий рычаг (сумматор); 3, 18 — оси; 4, 9 — заслонки; 5, 8 — сопла; 6, 10 — воздушные камеры; 7, 12, 12а, 20, 20а — сильфоны; 11 — мембрана; 13 — шток; 14, 16 — штифты; 15, 17 — рычаги; 19 — опора.

Увеличение $P_{\text{вых}}$ вызывает перемещение мембраны II МИМ и изменение воздействия x , направленное на уменьшение y .

При изменении $P_{\text{вых}}$ начинают работать обратные связи. Возрастание $P_{\text{вых}}$ приводит к сжатию сильфонов 12 и 12а, объем между которыми заполнен маслом, и перемещению штока 13 вправо. Штифт 14, закрепленный на штоке 13, будет поворачивать рычаг 15 вокруг оси 18. Это перемещение через штифт 16, который может двигаться по вертикали при вращении винта ДД, сообщится рычагу 17, и он станет передвигаться в направлении вращения часовой стрелки вокруг опоры 19. Ось 3 закреплена на рычаге 17, поэтому заслонка 4 начнет отодвигаться от сопла 5, т. е. начнет действовать отрицательная обратная связь. Произойдет временная стабилизация всех подвижных элементов — сумматоров, заслонок, однако выходная координата y объекта продолжает оставаться больше y_a вследствие инерционности самого объекта.

Одновременно с действием отрицательной обратной связи начинает работать и положительная запаздывающая связь, часто называемая изотропной. Эта связь образуется сильфонами 12, 12а, 20, 20а и регулируемым вручную дросселем ДИ. При возрастании $P_{\text{вых}}$ давление масла между сильфонами 12 и 12а становится больше, чем давление в полости правого сильфона. Начинается постепенный переток масла из левого сильфона в правый, вследствие чего шток 13 будет перемещаться влево, вызывая приближение заслонки 4 к соплу 5, новое увеличение $P_{\text{вых}}$ и постепенное уменьшение y . Скорость нарастания давления масла между сильфонами 20 и 20а и, следовательно, скорость изменения $P_{\text{вых}}$ будет зависеть от

степени открытия дросселя ДИ. Заметим, что действие положительной обратной связи не может быть сильнее, чем отрицательной.

Процесс перетока масла из одной полости сильфонной системы в другую будет продолжаться до тех пор, пока перепад давления на дросселе ДИ не станет равным нулю, что возможно только при $y=y_0$ и, строго говоря, при $t=\infty$. Фактически многие элементы регулятора обладают зонами нечувствительности, поэтому переходные процессы заканчиваются за конечное время.

Структурная схема регулятора типа 04 показана на рис. П.2, б, ПИ-закон реализуется тремя сумматорами, двумя усилителями, аperiodическим и двумя усилительными звеньями. Сумматор Σ_1 находится в измерительном приборе и на рисунке не показан. Усилитель давления реализован устройством сопло — заслонка и имеет достаточно большой коэффициент усиления $k_y \gg (20-40) 10^5$ Па/мм. Передаточная функция усилителя мощности равна единице.

Отрицательная обратная связь образована сильфонами 12, 12а, штоком 13 и системой рычагов и штифтов 14—17. Объем камеры 21 невелик, и приближенно динамику устройства отрицательной обратной связи можно описать произведением двух усилительных звеньев с передаточными функциями $W_{00c}(s)=k_1$ и $W'_y(s)=k_2$. Динамика устройства положительной обратной связи приближенно описывается произведением передаточных функций $W_{noc}(s)=k_1/(T_n s+1)$ и $W'_y(s)=k_2$. Коэффициент усиления k_1 зависит от жесткости сильфонов и пружин.

Сумматор Σ_2 реализуется трехплечим рычагом 2 и поворотным рычагом 17; сумматор Σ_3 — на базе штока 13 и системы пружин.

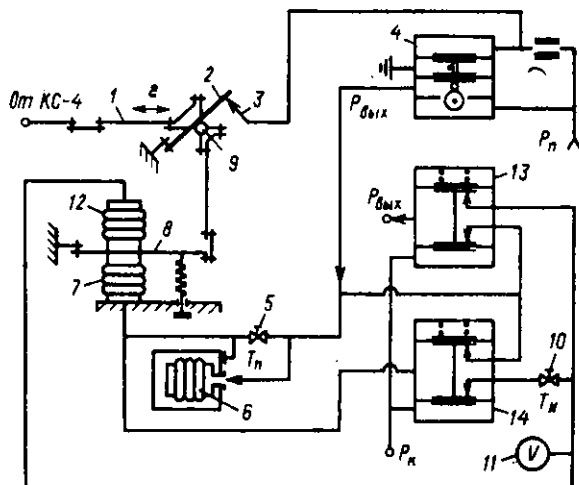


Рис. П.3. Пневматический регулятор ПР3.27М:

1 — тяга от прибора КС-4; 2 — заслонка; 3 — сопло; 4 — усилитель мощности; 5, 10 — регулируемые дроссели; 6, 7, 12 — сильфоны; 8 — рычаг; 9 — штифт; 11 — пневмокамера; 13, 14 — пневмоклапаны.

Найдем передаточную функцию регулятора:

$$W(s) = \frac{W_y(s) W_n(s)}{1 + W_y'(s) [W_{\text{ос}}(s) - W_{\text{пос}}(s)]} =$$

$$= \frac{k_y}{1 + k_2 [k_1 - k_1 / (T_n s + 1)]} \approx 1/k_1 k_2 + 1/k_1 k_2 T_n s = 1/\delta + 1/\delta T_n s$$

где δ — диапазон дросселирования (предел пропорциональности); T_n — время изодрома, варьируемое от 30 с до ∞ .

Пневматический регулятор ПРЗ.27М

Регулятор встраивается в приборы серии КС-4 и реализует ПИД-закон регулирования $W(s) = k(1 + 1/T_n s + T_n s)$, где $k = 1/\delta$ — коэффициент усиления, T_n — время изодрома, T_n — время предварения. Регулятор построен частично на элементах УСЭППА (два регулируемых дросселя, постоянное сопротивление, усилитель мощности, два реле), а также содержит три сильфона и механический узел.

Принципиальная схема регулятора приведена на рис. П.3. Он состоит из преобразователя перемещений в давление (элементы 1—3), усилителя мощности 4, устройств, реализующих дифференциальную (5, 6), интегральную (10, 11) и пропорциональную (7, 8, 9) составляющие; выключающих реле 13, 14.

Предположим, что $e(t)$ увеличилось, и тяга 1 переместилась вправо, что вызвало приближение заслонки 2 к соплу 3. Это приведет к увеличению давления воздуха перед усилителем мощности 4 и возрастанию $P_{\text{вых}}$. Сигнал $P_{\text{вых}}$ поступает через регулируемое сопротивление 5 и емкость (сильфон) 6 узла предварения и далее на сильфон отрицательной обратной связи 7. Растяжение сильфона приведет к изменению положения рычага 8 и штифта 9 в направлении удаления заслонки от сопла. Одновременно $P_{\text{вых}}$ проходит через регулируемый дроссель 10 в емкость 11 (узел интегрирования) и в сильфон 12 запаздывающей положительной обратной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ибрагимов И. А., Фарзана Н. Г., Илясов Л. В. Элементы и системы пневмоавтоматики. М., Высшая школа, 1975. 360 с.
2. Голубев В. С., Живов Н. П., Рызиков М. Л. Пневмоэлектронные системы управления химико-технологическими комплексами. М., Химия, 1977. 319 с.
3. Голинкевич Т. А. Прикладная теория надежности. М., Высшая школа, 1977. 159 с.
4. Склярский Э. И., Широколова А. В. Агрегатные комплексы техн. средств в АСУТП. М., ЦНИИТЭИ приборостроен., 1981. 67 с.
5. Амоль Ю. Д., Бугаенко А. И. и др. Комплекс программно-технических средств АСТРА для создания АСУТП. В кн.: Автоматизация химических производств. М., НИИТЭИхим, 1982, № 1.

ВАЛЕНТИН СЕРГЕЕВИЧ БАЛАКИРЕВ
АЛЕКСАНДР ЭЛЬХАНАНОВИЧ СОФИЕВ

**Применение средств пневмо-
и гидроавтоматики в химических
производствах**