

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ивановский государственный химико-технологический университет

А.П.САМАРСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ.

Пневматические системы

Учебное пособие

Иваново 2014

УДК 681.58

Самарский А.П. Технические средства автоматизации. Пневматические системы: учеб. пособие / А.П.Самарский; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.-Иваново, 2014. – 64 с.

В учебном пособии рассмотрены состав и структура агрегатных комплексов пневматической ветви государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации. Дано описание устройства и принципа действия, проанализированы статика и динамика типовых элементов, узлов, регуляторов и функциональных блоков агрегатных комплексов «Старт» и «Старт-2». Рассмотрены принципы построения и функционирования типовых систем автоматического регулирования, построенных на основе пневматических средств автоматизации.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 220400 «Управление в технических системах» и 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета

Рецензенты:

кафедра материаловедения, товароведения, стандартизации и метрологии
Ивановского государственного политехнического университета;
кандидат технических наук П.В. Гриневич (ПО ООО «Индасофт»)

Редактор В.Л. Родичева

Подписано в печать 3.06.2014 Формат 60×84 1/16. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 4,13 Тираж 50 экз. Заказ

Ивановский государственный химико-технологический университет

Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры экономики и
финансов «ИГХТУ»
153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 7

© Самарский А.П., 2014

© Ивановский государственный
Химико-технологический
университет, 2014

1. Общая характеристика пневматической ветви ГСП

Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) является основой технического обеспечения информационно-управляющих систем в промышленной и непромышленной сферах экономики. Данная система представляет собой рационально организованную совокупность приборов и устройств, предназначенных для построения автоматических и автоматизированных систем измерения, контроля, регулирования и управления технологическими процессами. Общие принципы построения ГСП формулируются следующим образом:

- целенаправленность системы на обеспечение техническими средствами автоматизации и управления (ТСА) различных отраслей промышленности при условии минимизации затрат на разработку и внедрение средств автоматизации;
- целостность системы, позволяющая создавать проблемно- и объектно-ориентированные комплексы технических средств на основе ограниченной номенклатуры изделий;
- обеспечение жизнеспособности и универсальности использования ТСА на основе принципов унификации и агрегатирования;
- совершенствование номенклатуры и технических характеристик ТСА по принципу преемственности;
- совместимость ТСА на основе унификации элементной и конструктивной базы, параметров сигналов связи, устройств сопряжения, технических и эксплуатационных требований.

ГСП состоит из ряда обособленных и достаточно устойчивых групп изделий, которые могут быть классифицированы по многим признакам. Одним из наиболее общих способов классификации ТСА является классификация по информационным характеристикам (рис. 1.1).

Функциональное назначение ТСА в большинстве случаев очевидно и подробных комментариев не требует. Одной из важнейших информационных характеристик ТСА является вид используемой энергии. По этому признаку в ГСП выделяют электрическую, пневматическую и гидравлическую ветви. Благодаря интенсивному развитию вычислительной и микропроцессорной техники, электрическая ветвь является в настоящее время приоритетной группой технических средств. Однако приборы и агрегатные комплексы пневматической ветви не теряют своего значения благодаря своей простоте, относительной дешевизне и, что особенно важно, пожаро- и взрывобезопасности. Недостатками пневматических приборов и устройств являются относительно низкое быстродействие и трудность реализации сложных алгоритмов регулирования и управления. Приборы и устройства гидравлической ветви применяются в тех случаях, когда управление технологическим объектом требует больших перестановочных усилий.

Предметом изучения в настоящем учебном пособии являются приборы и устройства пневматической ветви ГСП.



Рис. 1.1. Классификация ТСА по информационным характеристикам

Информация, используемая в пневматических системах автоматизации, представлена, преимущественно, в аналоговой, и частично, в дискретной форме. Вместе с тем, все шире используются электропневматические преобразователи, входная информация которых представлена в цифровой форме.

Передача информации в пневматических системах автоматизации осуществляется с помощью унифицированного аналогового пневмосигнала – давления сжатого воздуха в пределах $0,2 \div 1 \text{ кгс/см}^2$ и унифицированного дискретного пневмосигнала – давления сжатого воздуха с логическими уровнями «0» – $0 \div 0,1 \text{ кгс/см}^2$ и «1» – $1 \div 1,5 \text{ кгс/см}^2$.

По метрологическому признаку пневматические приборы и устройства делят на средства измерения и изделия, не являющиеся средствами измерения. Отличительной чертой средств измерения являются нормативные требования к точности приборов, а также к периодичности и условиям проведения поверки.

Для описания внутренней структуры пневматической ветви ГСП более удобно использовать иерархическую классификацию, приведенную на рис. 1.2. Пневматическая ветвь ГСП содержит четыре группы технических средств, расположенных на разных уровнях иерархии. Средства первого уровня имеют непосредственную связь с объектом управления и осуществляют преобразование значений технологических параметров в унифицированные пневматические сигналы или унифицированных пневматических



Рис.1.2. Структура пневматической ветви ГСП

сигналов в пропорциональные регулирующие воздействия. На втором уровне располагаются средства контроля и регулирования, применяемые в простейших системах автоматизации. Средства третьего уровня предназначены для построения локальных систем регулирования и управления, а средства четвертого уровня – для построения систем централизованного контроля и регулирования. Связь технических средств всех уровней с приборами и устройствами электрической ветви ГСП осуществляется с помощью пневмоэлектрических и электропневматических преобразователей. Верхние уровни иерархии представлены агрегатными комплексами технических средств, построенными в соответствии с принятыми в ГСП методами агрегатирования.

Под агрегатным комплексом понимают совокупность изделий, взаимосвязанных по функциональному назначению, конструкции и основным параметрам. Агрегатные комплексы (АК) имеют технически и экономически обоснованную номенклатуру, обеспечивающую решение всех функциональных задач, вытекающих из назначения АК.

Основными характеристиками АК являются:

- назначение и область применения АК;
- структура и состав АК (классифицированная по функциональному признаку номенклатура изделий и основные характеристики функциональных групп);
- условия совместимости приборов и устройств АК (единый перечень требований к информационным, энергетическим, конструктивным, метрологическим и эксплуатационным характеристикам всех изделий АК);
- условия взаимосвязи (условия обеспечения информационной совместимости) с другими АК;

- конструктивная и элементная база АК (типовые элементы и используемые методы агрегатирования).

Агрегатирование в ГСП базируется на возможности разложения сложных информационно-управляющих функций на более простые составляющие. Эти простые составляющие реализуются в виде унифицированных функционально-конструктивных единиц, из которых строятся приборы, устройства и комплексы различного назначения.

В ГСП общепринятыми являются два метода агрегатирования – метод базовой конструкции и метод унифицированного типового конструктива (рис.1.3).

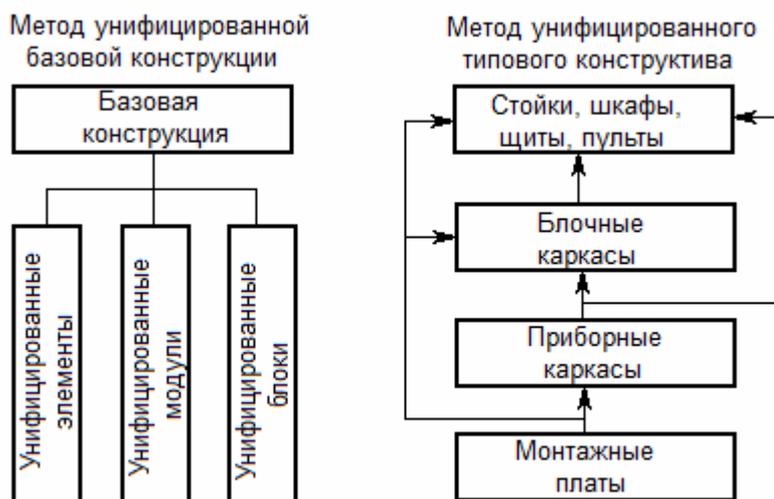


Рис. 1.3. Методы агрегатирования в ГСП

При использовании метода базовой конструкции конструктивными единицами являются унифицированные элементы, модули и блоки. Элементами считают простейшие унифицированные составляющие. Из определенного набора унифицированных элементов создаются базовые модули. Модуль – конструк-

тивно целостное устройство, выполняющее в системах автоматизации и управления одну типовую функцию. Унифицированный блок – автономное изделие, состоящее из нескольких унифицированных модулей и выполняющее в системах автоматизации функции измерения, контроля, регулирования, управления, а также сбора, обработки и представления информации. По методу унифицированной базовой конструкции технические средства с новыми характеристиками создаются путем агрегатного объединения унифицированных элементов, модулей и блоков на основе общей базовой конструкции. В результате образуются параметрические ряды приборов и устройств одного функционального назначения.

Метод унифицированного типового конструктива предполагает существование иерархической системы унифицированных узлов и деталей. Нижний уровень составляют монтажные платы, средний – приборные и блочные каркасы и верхний – несущие конструкции (стойки, щиты, шкафы и др.). Элементы конструкций низших уровней служат для компоновки конструкций высших уровней.

Агрегатные комплексы пневматической ветви ГСП строятся с применением метода унифицированной базовой конструкции. В настоящее время в состав пневматической ветви входят агрегатные комплексы «Старт» и

«Старт-2». В состав этих агрегатных комплексов входят пневматические регуляторы, реализующие типовые законы регулирования, блоки статических, динамических и аналого-релейных преобразования пневмосигналов и вторичные измерительные приборы, выполняющие в системах регулирования функции индикации и регистрации пневмосигналов, а также функции ручного дистанционного управления технологическим процессом.

2. Элементная база пневматических приборов и устройств

Элементную базу приборов и устройств, входящих в агрегатные комплексы пневматической ветви ГСП, можно представить в виде двухуровневой системы унифицированных элементов.

Нижний уровень представлен простейшими составляющими пневматических приборов и устройств, для которых не предусмотрено выполнение самостоятельных функций в системах контроля и управления. К этой группе относятся пневмосопротивления (дроссели), пневмоемкости, мембраны и сильфоны. Функциональное назначение этих элементов однозначно вытекает из их принципа работы и не зависит от их конкретного применения.

На верхнем уровне находятся элементы, выполняющие простейшие аналоговые, дискретные и аналого-дискретные операции обработки пневмосигналов, а также вспомогательные элементы, реализующие функции управления, переключения и т.п. С целью унификации этой группы элементов была создана универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики УСЭПА. Система УСЭПА представляет собой функционально полный набор пневматических элементов и позволяет строить устройства обработки пневмосигналов практически любой сложности. В эту систему входят:

- дроссели (пневмосопротивления);
- пневмоемкости (регулируемая и постоянная);
- пневмоусилители (элементы сравнения);
- повторители пневмосигналов;
- пневмореле (в разных конструктивных исполнениях);
- пневмоклапаны;
- элементы памяти непрерывного сигнала;
- задатчики;
- элементы памяти дискретного сигнала;
- индикаторы (бленкеры);
- конечные выключатели;
- пневмокнопки;
- пневмотумблеры.

Монтаж элементов УСЭПА осуществляется на специальных многослойных платах с внутренними каналами. Энергетическая совместимость элементов предусматривает организацию их питания от унифицированных источников очищенного и осушенного сжатого воздуха с давлением $1,4 \text{ кгс/см}^2$.

2.1. Дроссели

Пневматическим дросселем называют элемент, оказывающий гидравлическое сопротивление потоку сжатого воздуха. По устройству дроссели представляют собой каналы различной формы и размеров в твердом теле. Дроссели классифицируются по трем признакам – по режиму движения воздуха в канале дросселя, по возможности изменения основных параметров и по конструктивному исполнению. Основной характеристикой дросселя является расходная характеристика – зависимость массового расхода воздуха G через дроссель от перепада давления на дросселе $\Delta P = P_1 - P_2$, где P_1 и P_2 – давления воздуха, соответственно, на входе и выходе дросселя.

По режиму движения воздуха в канале дросселя различают турбулентные и ламинарные дроссели. Расходная характеристика турбулентного дросселя имеет вид:

$$G = K\varepsilon S_0 \sqrt{2\rho_1(P_1 - P_2)}, \quad (2.1)$$

где K – коэффициент расхода, ε – поправка на сжимаемость воздуха, S_0 – площадь поперечного сечения канала дросселя и ρ_1 – плотность воздуха при давлении P_1 . В устройствах обработки пневмосигналов турбулентные дроссели применяются редко из-за нелинейности расходной характеристики. Более широкое применение в пневматических приборах и устройствах находят ламинарные дроссели с расходной характеристикой вида:

$$G = \frac{\pi d^4 \rho_{CP}}{128\mu l} (P_1 - P_2), \quad (2.2)$$

где d и l – соответственно, диаметр и длина канала дросселя, μ – динамическая вязкость воздуха при данной температуре и ρ_{CP} – плотность воздуха при усредненном давлении $P_{CP} = \frac{P_1 + P_2}{2}$. Анализируя уравнение (2.2), можно

прийти к выводу, что расходная характеристика ламинарного дросселя также должна обладать некоторой нелинейностью, поскольку величина ρ_{CP} зависит от давлений P_1 и P_2 . Однако перепады давлений на дросселях в устройствах обработки пневмосигналов имеют относительно малую величину, поэтому нелинейностью расходной характеристики ламинарного дросселя обычно пренебрегают. В этом случае множитель $\alpha = \frac{\pi d^4 \rho_{CP}}{128\mu l}$, называемый проводи-

мостью дросселя, можно считать постоянной величиной. Линейная расходная характеристика ламинарного дросселя запишется, как

$$G = \alpha(P_1 - P_2), \quad (2.3)$$

откуда можно заключить, что проводимость численно равна массовому расходу воздуха через дроссель при единичном перепаде давления.

По возможности изменения параметров дросселя в процессе функционирования различают постоянные, регулируемые и переменные дроссели.

Проводимость постоянного дросселя определяется его конструктивными параметрами и не меняется в процессе функционирования. Проводимость регулируемого дросселя можно изменять вручную с помощью органов настройки, а проводимость переменного дросселя можно изменять дистанционно с помощью передаточных механизмов.

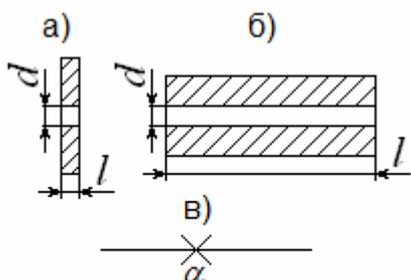


Рис.2.1. Постоянные дроссели
а-жиклер; б-капилляр;
в-условное обозначение

Классификация дросселей по конструктивному исполнению определяет геометрию канала дросселя и форму его составных частей. Постоянные дроссели подразделяются на жиклеры и капилляры (рис.2.1). Для жиклеров длина канала l дросселя соизмерима с диаметром канала, для капилляров длина канала намного превосходит его диаметр. Жиклеры, как правило, относятся к турбулентным дросселям, а

капилляры – к ламинарным. Регулируемые и переменные дроссели классифицируются по форме подвижной и неподвижной частей (рис.2.2). Проводимость таких дросселей зависит от формы и размеров зазора между подвижной и неподвижной частями.

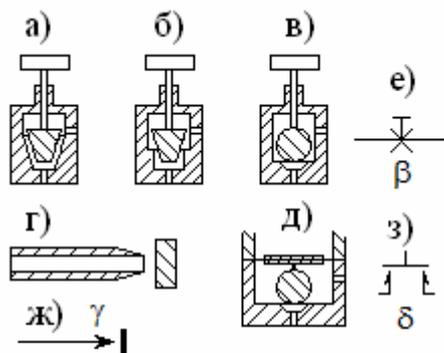


Рис.2.2. Регулируемые (а - в), переменные (г, д) дроссели и их условные обозначения (е - з)

Регулируемые дроссели подразделяются на дроссели типа «конус-конус» (рис.2.2,а), «конус-цилиндр» (рис.2.2,б) и «шарик-седло» (рис.2.2,в).

Переменные дроссели подразделяются на дроссели типа «сопло-заслонка» (рис.2.2,г) и «шарик-седло» (рис.2.2,д). Дроссели типа «шарик-седло» (как регулируемые, так и переменные) сохраняют хорошую линейность расходной характеристики в несколько большем диапазоне расходов по сравнению с другими типами дросселей.

2.2. Пневмоемкости

Пневмоемкости предназначены для накопления сжатого воздуха. В устройствах обработки пневмосигналов используют постоянные и регулируемые пневмоемкости (рис.2.3). Постоянная емкость представляет собой сосуд с одним или несколькими штуцерами для подачи воздуха. Регулируемая емкость может изменять объем при перемещении поршня. При анализе устройств обработки пневмосигналов принято считать воздух идеальным газом, следовательно, состояние воздуха в емкости в статике характеризуется уравнением Клапейрона-Менделеева:

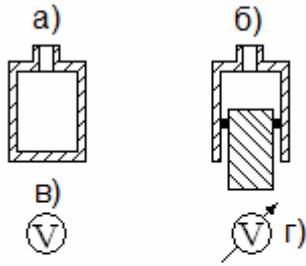


Рис.2.3. Пневмоемкости: а- постоянная, б-регулируемая, в,г-условные обозначения

$$m = \frac{PVM}{R\Theta}, \quad (2.4)$$

где m – масса воздуха в емкости, P и V – соответственно, давление воздуха и объем емкости, M – средняя молярная масса воздуха, R – газовая постоянная и Θ – абсолютная температура.

2.3. Пневмокамеры

Пневмокамерой называют соединение пневмоемкости с одним или несколькими дросселями. В устройствах пневмоавтоматики пневмокамера используется в качестве основной динамической структуры. Пневмокамеру с одним дросселем называют «глухой», с двумя и более дросселями – проточной. Уравнение динамики пневмокамеры выводится при следующих допущениях: 1) воздух является идеальным газом; 2) течение воздуха в дросселях ламинарно и изотермично; 3) проводимости дросселей не зависят от перепадов давления.

Рассмотрим проточную камеру с двумя дросселями, подключенную к двум источникам давления (рис.2.4). Выходным давлением пневмокамеры будем считать давление в емкости V . Дифференцируя уравнение (2.4) по времени, можно заключить, что при изменении давления $P_{вых}$ скорость изменения массы

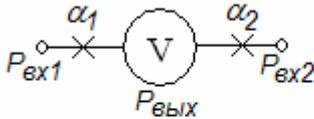


Рис.2.4. Схема проточной камеры

воздуха в емкости V равна:

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{VM}{R\Theta} \frac{dP_{вых}}{d\tau}. \quad (2.5)$$

В то же время, производная $\frac{dm}{d\tau}$ представляет собой массовый расход воздуха через емкость, который равен разности массовых расходов через дроссели α_1 и α_2 . С учетом расходных характеристик дросселей вида (2.3) можно записать:

$$\frac{dm}{d\tau} = G_1 - G_2 = \alpha_1(P_{вх1} - P_{вых}) - \alpha_2(P_{вых} - P_{вх2}). \quad (2.6)$$

Объединим уравнения (2.5) и (2.6), разделим обе части уравнения на $(\alpha_1 + \alpha_2)$ и перенесем слагаемые с $P_{вых}$ в левую часть. Тогда получим:

$$\frac{VM}{R\Theta(\alpha_1 + \alpha_2)} \frac{dP_{вых}}{d\tau} + P_{вых} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} P_{вх1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} P_{вх2}. \quad (2.7)$$

Данное соотношение является уравнением динамики апериодического звена 1-го порядка с двумя входами. Здесь множитель $\frac{VM}{R\Theta(\alpha_1 + \alpha_2)}$ представляет со-

бой постоянную времени, а множители $\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$ и $\frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$ являются коэффициентами передачи по входам. Приведенные рассуждения можно распространить на пневмокамеру с произвольным числом (N) дросселей:

$$T \frac{dP_{вых}}{d\tau} + P_{вых} = \sum_{i=1}^N K_i P_{вxi}, \quad (2.8)$$

где $T = \frac{VM}{R\Theta \sum_{i=1}^N \alpha_i}$ и $K_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{j=1}^N \alpha_j}$. Из уравнений (2.7) и (2.8) следует, что в

статике, т.е. при $\frac{dP_{вых}}{d\tau} = 0$, пневмокамера работает, как сумматор давлений:

$$P_{вых} = \sum_{i=1}^N K_i P_{вxi}. \quad (2.9)$$

Другой важный вывод из уравнений (2.7) и (2.8) заключается в том, что сумма коэффициентов передачи по всем входам пневмокамеры тождественно равна единице:

$$\sum_{i=1}^N K_i \equiv 1. \quad (2.10)$$

2.4. Сильфоны и мембраны

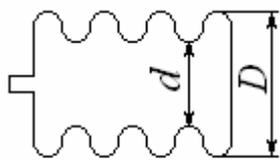


Рис.2.5. Сильфон

Сильфоны и мембраны используются в пневматических устройствах для преобразования давления сжатого воздуха в усилие или механическое перемещение. Сильфон (рис.2.5) представляет собой тонкостенный гофрированный стакан из бронзы или стали. Основным параметром сильфона – эффективную площадь $F_{эф}$ можно определить из соотношения:

$$F_{эф} = \frac{\pi}{16} (D + d)^2. \quad (2.11)$$

Статическая характеристика сильфона при преобразовании давления в усилие имеет вид:

$$N = F_{эф} \Delta P, \quad (2.12)$$

где N – усилие, приложенное ко дну сильфона, ΔP – разность давлений внутри и снаружи сильфона. При преобразовании давления в перемещение статическая характеристика сильфона принимает вид:

$$N = \frac{F_{эф}}{K_{упр}} \Delta P, \quad (2.13)$$

где $K_{упр}$ – коэффициент жесткости сильфона. Жесткость сильфонов невелика, поэтому во многих случаях сильфон усиливают цилиндрической многовит-

ковой пружиной. Это стабилизирует коэффициент передачи при некотором снижении чувствительности сильфона.

В пневматической технике используют мембраны двух типов – упругие и эластичные. Упругие мембраны представляют собой гофрированные диски из бронзы или стали. Они обладают высокой жесткостью и практически не имеют гистерезиса статической характеристики. Такие мембраны применяют, в основном, в качестве чувствительных элементов при измерении давлений. Эластичная мембрана (рис.2.6) представляет собой диск из армированной резины с установленным на нем жестким центром.

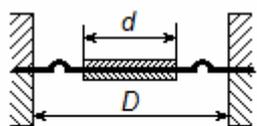


Рис.2.6. Эластичная мембрана

Жесткий центр обеспечивает возможность контакта мембраны с передаточными механизмами, а также увеличивает эффективную площадь мембраны, вычисляемую по формуле:

$$F_{эф} = \frac{\pi}{12}(D^2 + d^2 + Dd). \quad (2.14)$$

Эластичные мембраны с жестким центром используются как преобразователи давления в усилие или перемещение и имеют статические характеристики вида (2.12) и (2.13).

Динамика мембран и сильфонов в общем случае описывается звеньями второго порядка с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{k}{T_2 s^2 + T_1 s + 1}, \quad (2.15)$$

где k – коэффициент передачи, зависящий от эффективной площади и жесткости сильфона (мембраны), а T_1 и T_2 – постоянные времени, определяемые массой и вязкоупругими свойствами материала сильфона (мембраны). В то же время для мембран и сильфонов с небольшими массами величины T_1 и T_2 очень малы, и в области низких частот можно описывать динамические свойства мембран и сильфонов пропорциональными звеньями.

2.5. Элементы сравнения

Элемент сравнения представляет собой дифференциальный усилитель давления с большим коэффициентом передачи. Элемент сравнения (рис.2.7) состоит из корпуса 1, мембранного блока 2 и двух переменных дросселей типа «сопло – заслонка» 3.

Мембранный блок элемента сравнения содержит нечетное число (3, 5 или 7) эластичных мембран с жестким центром. В мембранном блоке чередуются мембраны с малым и большим жестким центром и, соответственно, с малой и большой эффективной площадью. Торцы мембранного блока выполняют функцию заслонок в переменных дросселях. Про-

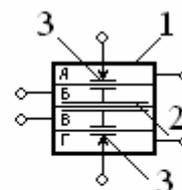


Рис.2.7. Элемент сравнения

странства, ограниченные мембранами и корпусом, образуют камеры элемента сравнения.

Принцип работы элемента сравнения основан на зависимости проводимостей переменных дросселей от положения мембранного блока. В пневматических приборах используют несколько схем включения элементов сравнения.

Наиболее распространенной является симметричная схема (рис.2.8). В данной схеме камеры «А» и «Г» объединяются в проточную камеру с двумя переменными дросселями. Давления в этих камерах всегда одинаковы, по-

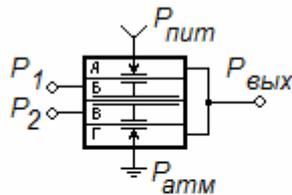


Рис.2.8. Симметричная схема включения элемента сравнения

этому выходное давление элемента сравнения не влияет на положение мембранного блока. В глухие камеры «Б» и «В» подаются входные давления P_1 и P_2 . Увеличение давления P_1 будет вызывать повышение выходного давления, поэтому камеру «Б» будем считать «положительной». Камера «В», соответственно, будет «отрицательной». Статическую характеристику симметрично включенного элемента сравнения выведем, исходя из следующих до-

пущений:

- течение воздуха в дросселях ламинарно и изотермично;
- исходным положением мембранного блока является крайнее верхнее;
- зависимости проводимостей переменных дросселей от положения мембранного блока имеют вид линейных функций.

В соответствии с (2.9) выходное давление элемента сравнения определяется из соотношения:

$$P_{вых} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} P_{пит} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} P_{атм} \quad \text{или, так как } P_{атм} = 0,$$

$$P_{вых} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} P_{пит}, \quad (2.16)$$

где α_1 и α_2 – проводимости дросселей в камерах «А» и «Г», соответственно. Согласно принятым допущениям проводимости α_1 и α_2 являются линейными функциями положения мембранного блока h :

$$\alpha_1 = K_\alpha h; \quad \alpha_2 = \alpha_{max} - K_\alpha h, \quad (2.17)$$

где α_{max} – проводимость полностью открытого переменного дросселя и K_α – коэффициент пропорциональности. Положение мембранного блока h определяется разностью входных давлений $P_1 - P_2$:

$$h = \frac{F - f}{K_{упр}} (P_1 - P_2), \quad (2.18)$$

где F и f – эффективные площади мембран, соответственно, с большим и малым жестким центром и $K_{упр}$ – жесткость мембранного блока. Объединив

соотношения (2.16 – 2.18) получим статическую характеристику симметрично включенного элемента сравнения:

$$P_{\text{вых}} = \frac{K_{\alpha} (F - f) P_{\text{пит}}}{\alpha_{\text{max}} K_{\text{упр}}} (P_1 - P_2). \quad (2.19)$$

При постоянстве давления питания эта характеристика является линейной функцией с коэффициентом $K_N = \frac{K_{\alpha} (F - f) P_{\text{пит}}}{\alpha_{\text{max}} K_{\text{упр}}}$. Величина K_N доста-

точно велика – порядка 300, что позволяет строить на элементах сравнения различные преобразователи давления с использованием функциональных обратных связей. В то же время высокое значение K_N может стать причиной потери устойчивости пневматического узла или устройства, например, при использовании инерционных отрицательных обратных связей. В этих случа-

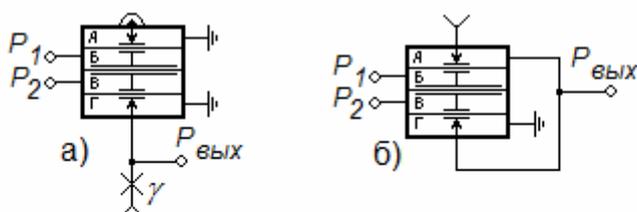


Рис.2.9. Альтернативные схемы включения элемента сравнения: а- симметричная, б-несимметричная

ях коэффициент K_N может быть снижен путем изменения схемы включения (рис.2.9,а). В альтернативной симметричной схеме переменный дроссель в камере «А» заглушен, его функции выполняет постоянный

дроссель γ . Это позволяет снизить величину K_N на 30÷40%. В других случаях, например, в выходных каскадах преобразователей с применением грубых пневмоповторителей необходимо обеспечить максимально возможный коэффициент передачи элемента сравнения. Это достигается использованием несимметричной схемы включения (рис.2.9.б), которая позволяет повысить величину K_N на 15÷20%.

2.6. Пневмоповторители

Пневмоповторители реализуют следующее уравнение статики:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}}. \quad (2.20)$$

В пневматических приборах и устройствах пневмоповторители выполняют три основных функции:

- разделение пневматических элементов с целью устранения их взаимного влияния;
- сдвиг пневматических сигналов на настраиваемую постоянную величину;
- усиление пневмосигналов по мощности.

Первую функцию обрабатывают маломощные повторители без сдвига (рис.2.10). Статическая характеристика повторителя без сдвига выводится с

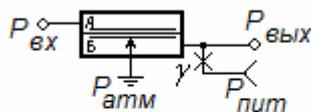


Рис.2.10. Маломощный повторитель без сдвига

использованием тех же допущений, что и для элемента сравнения. Мембрана повторителя под воздействием разности давлений получает перемещение h :

$$h = \frac{F}{K_{упр}} (P_{вх} - P_{вых}). \quad (2.21)$$

При малых перемещениях мембраны можно считать выходное давление повторителя линейной функцией перемещения h :

$$P_{вых} = K_h h, \quad (2.22)$$

где K_h – коэффициент пропорциональности. Объединив (2.21) и (2.22), получим:

$$P_{вых} \left(1 + \frac{K_h F}{K_{упр}}\right) = \frac{K_h F}{K_{упр}} P_{вх}. \quad (2.23)$$

Конструктивные параметры повторителя таковы, что $\frac{K_h F}{K_{упр}} \gg 1$, поэтому единицей в левой части соотношения (2.23) можно пренебречь. В этом случае уравнение (2.23) вырождается в (2.20).

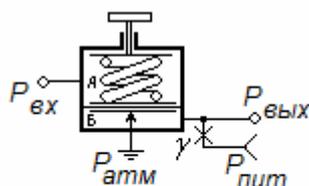


Рис.2.11. Маломощный повторитель со сдвигом

Вторая функция реализуется с помощью повторителей со сдвигом (рис.2.11). В камере «А» этого повторителя находится многovitковая пружина с регулируемым усилием сжатия (растяжения). Это усилие приложено к мембране повторителя и вызывает сдвиг пневмосигнала на величину $\Delta = \frac{N}{F}$, где N – усилие сжатия

(растяжения) пружины. Статическая характеристика повторителя со сдвигом запишется, как

$$P_{вых} = P_{вх} \pm \Delta. \quad (2.24)$$

Третья функция обрабатывается двумя типами повторителей – грубым мощным и точным мощным. Усиление пневмосигналов по мощности необходимо для обеспечения

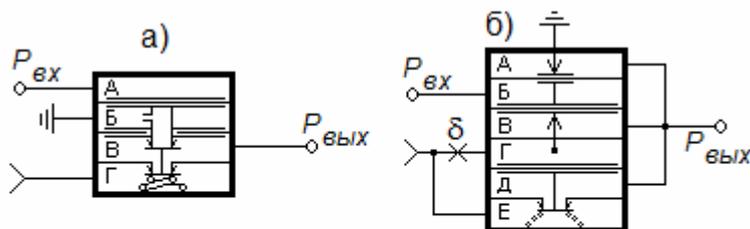


Рис.2.12. Повторители: а-грубый мощный; б-точный мощный

достаточного расхода воздуха на выходах пневматических приборов и устройств. Грубый мощный повторитель (рис.2.12,а) по принципу действия аналогичен маломощному повторите-

лю без сдвига, но построен на основе переменного дросселя типа «шарик-седло». Грубый мощный повторитель имеет довольно низкую чувствительность, поэтому используется в паре с элементом сравнения. Точный мощный повторитель (рис.2.12,б) является конструктивным объединением элемента сравнения и грубого мощного повторителя.

2.7. Трехмембранные реле

Трехмембранные реле преобразуют непрерывные унифицированные пневмосигналы в дискретные с логическими уровнями «0» = 0 кгс/см² и «1» = 1,4 кгс/см². По устройству и принципу работы трехмембранные реле аналогичны элементам сравнения, однако вместо переменных дросселей в них устанавливаются управляемые пневмоклапаны, которые могут находиться в одном из двух состояний – открытом или закрытом. Для получения релейной статической характеристики трехмембранные реле включают по несимметричной схеме (рис.2.13). На один из входов реле подают постоянное давление подпора $P_{\text{п}}$, на другой вход поступает управляющее давление $P_{\text{вх}}$. Положение мембранного блока определяется алгебраической суммой усилий, формируемых на мембранном блоке давлениями в камерах реле:

$$N_{\Sigma} = P_{\text{вых}}f + P_{\text{Б}}(F - f) - P_{\text{В}}(F - f), \quad (2.25)$$

где $P_{\text{Б}}$ и $P_{\text{В}}$ – давления в камерах «Б» и «В», соответственно. При $N_{\Sigma} > 0$ реле находится в состоянии логической единицы, при $N_{\Sigma} < 0$ реле находится в состоянии логического нуля.

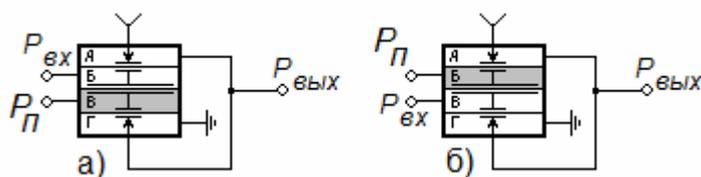


Рис.2.13.Схемы включения трехмембранного реле: а- с большим подпором, б- с малым подпором

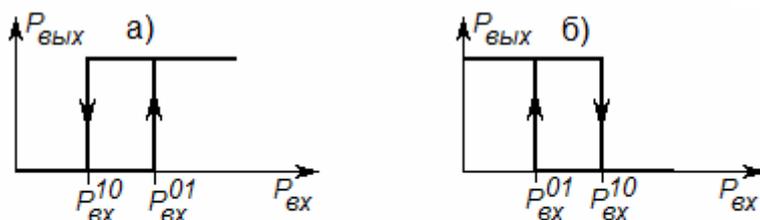


Рис.2.14. Статические характеристики трехмембранного реле: а- схема с большим подпором, б- схема с малым подпором

В схеме с большим подпором (рис.2.13,а) в камеру «В» подают давление порядка 0,8 кгс/см². В исходном состоянии давление подпора смещает мембранный блок вверх и устанавливает реле в состояние логического нуля. С увеличением входного давления при достижении порога переключения $P_{\text{вх}}^{01}$ произойдет переключение реле в состояние логической единицы. В соответствии

с (2.25) величина $P_{\text{вх}}^{01}$ определяется соотношением:

$$P_{вх}^{01} = P_{п} . \quad (2.26)$$

При снижении входного давления до величины порога переключения $P_{вх}^{10}$ произойдет обратное переключение реле. В соответствии с (2.25) величина $P_{вх}^{10}$ определяется, как:

$$P_{вх}^{10} = P_{п} - \frac{P_{пит} f}{F - f} . \quad (2.27)$$

Статическая характеристика трехмембранного реле, включенного по схеме с большим подпором, представлена на рис.2.14,а.

В схеме с малым подпором (рис.2.13,б) в камеру «Б» подают давление порядка $0,3 \text{ кгс/см}^2$. В исходном состоянии давление подпора смещает мембранный блок вниз и устанавливает реле в состояние логической единицы.

С увеличением входного давления при достижении порога переключения $P_{вх}^{10}$ произойдет переключение реле в состояние логической единицы. В соответствии с (2.25) величина $P_{вх}^{10}$ определяется соотношением:

$$P_{вх}^{10} = P_{п} + \frac{P_{пит} f}{F - f} . \quad (2.28)$$

Обратное переключение произойдет при $P_{вх}^{01} = P_{п}$. Статическая характеристика трехмембранного реле, включенного по схеме с малым подпором, представлена на рис.2.14,б.

2.8. Линейные пульсирующие дроссели

Расходная характеристика ламинарного дросселя в виде (2.2) обладает некоторой нелинейностью, которая допустима при реализации алгоритмов регулирования, но нежелательна при выполнении вычислительных операций над пневмосигналами. Этому недостатка лишены линейные пульсирующие дроссели (рис.2.15), обладающие свойствами ламинарного дросселя с линейной расходной характеристикой. Данный элемент состоит из корпуса 1, двух

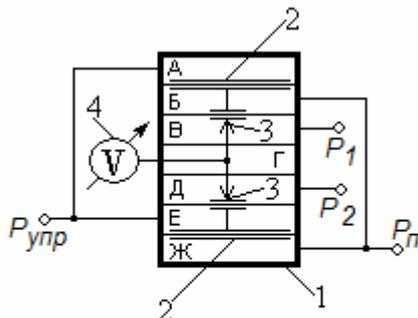


Рис.2.15. Линейный пульсирующий дроссель

независимых мембранных блоков 2, двух управляемых пневмоклапанов 3 и регулируемой пневмоемкости 4. В камеры «Б» и «Ж» элемента подается давление подпора $P_{п}$, а в камеры «А» и «Е» - управляющее давление $P_{упр}$.

$P_{п} \approx 0,8 \text{ кгс/см}^2$, а $P_{упр}$ имеет вид прямоугольных импульсов с амплитудой $1,4 \text{ кгс/см}^2$ и периодом следования t (рис.2.16). Управляющее давление циклически изменяет положение мембранных блоков и проводимости пневмоклапанов. В течение первого полупериода $t/2$

клапан в камере «В» будет открыт, а в камере «Д» – закрыт, пневмочемкость будет соединена с источником давления P_1 . Масса воздуха в емкости будет равна $m_1 = \frac{VM}{R\Theta} P_1$. В течение второго полупериода пневмочемкость будет соединена с источником давления P_2 и масса воздуха в ней будет равна $m_2 = \frac{VM}{R\Theta} P_2$. Проводимости открытых пневмоклапанов достаточно велики, поэтому переходными процессами при переключениях можно пренебречь.

Таким образом за промежуток времени t через емкость проходит воздух

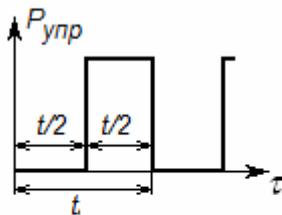


Рис.2.16. Управляющее давление линейного пульсирующего дросселя

массой $\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{VM}{R\Theta} (P_1 - P_2)$, а

средний расход воздуха от источника P_1 будет равен

$$G_{cp} = \frac{\Delta m}{t} = \frac{VM}{R\Theta t} (P_1 - P_2). \quad (2.29)$$

При постоянных значениях V и t выражение (2.29) эквивалентно (2.3), где отношение $\frac{VM}{R\Theta t}$ будет играть роль проводимости дросселя. Управлять проводимостью линейного пульсирующего дросселя можно изменением объема емкости V или периода управляющих импульсов t .

2.9. Вспомогательные пневматические элементы

К наиболее часто используемым вспомогательным элементам системы УСЭППА относятся пневмокнопки, пневмотумблеры, управляемые пневмоклапаны, а также дискретные пневмоэлектрические преобразователи.

Принцип работы этих элементов заключается в коммутации пневматических каналов или электрических цепей при воздействии на мембраны элементов и связанные с ними коммутационные устройства (пневмоклапаны или электрические контакты).

Вспомогательные элементы используются в схемах пневматических приборов и устройств для управления режимами работы и для реализации логических операций над дискретными пневматическими сигналами. Дискретные пневмоэлектрические преобразователи могут также использоваться в качестве элементов сигнализации систем управления технологическими процессами.

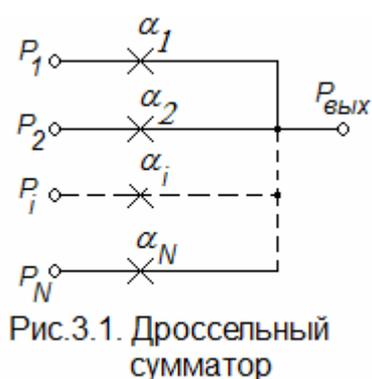
3. Типовые узлы обработки пневмосигналов

По функциональному назначению узлы обработки пневмосигналов делятся на следующие группы:

- узлы статических преобразований;
- узлы динамических преобразований;
- генераторы пневматических сигналов.

3.1. Узлы статических преобразований пневмосигналов

Наиболее распространенными статическими преобразованиями пневмосигналов являются алгебраическое суммирование и умножение на постоянный коэффициент.



Суммирование пневмосигналов может осуществляться двумя способами – с использованием дроссельных сумматоров и с использованием элементов сравнения. Дроссельный сумматор (рис.3.1) представляет собой соединение в одной точке N дросселей. Статическая характеристика дроссельного сумматора описывается соотношениями (2.9) и (2.10). Динамика дроссельного сумматора эквивалентна динамике пневмокамеры относительно малого объема. Достоинствами дроссельного сумматора являются: предельная простота и неограниченное число входов. В качестве недостатков данного способа суммирования можно отметить невысокую точность, обусловленную нелинейностью расходных характеристик дросселей, неизбежное масштабирование сигналов при суммировании и невозможность модификации алгоритма преобразования. Этими недостатками

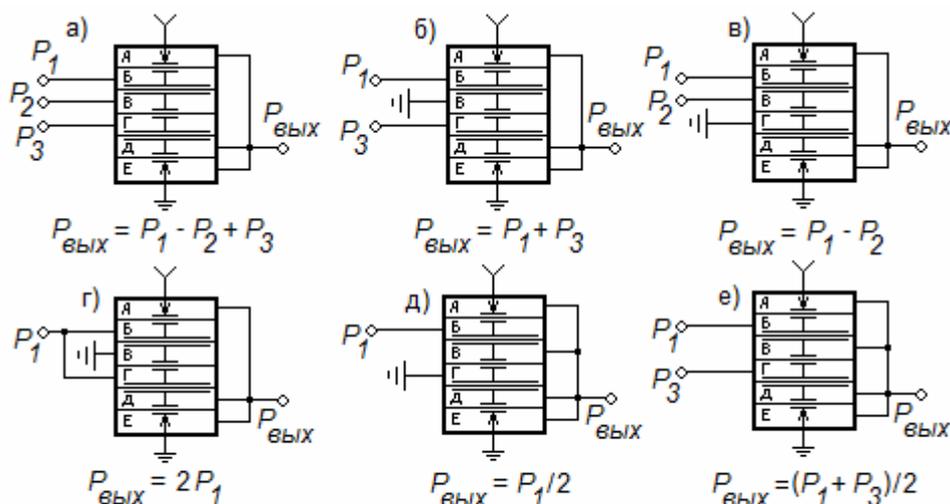


Рис.3.2. Алгебраические операции, выполняемые элементом сравнения

лишен симметрично включенный элемент сравнения, охваченный 100%-й отрицательной обратной связью (рис.3.2,а). Использование элемента сравнения в качестве сумматора позволяет повысить точность суммирования и, при необходимости, модифицировать алгоритм суммирования, как это показано на рис.3.2,б – е. Недостатком элемента сравнения, как сумматора пневмосигналов, является ограниченное число входов.

цировать алгоритм суммирования, как это показано на рис.3.2,б – е. Недостатком элемента сравнения, как сумматора пневмосигналов, является ограниченное число входов.

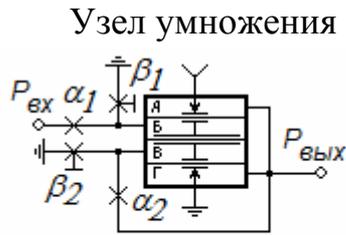


Рис.3.3. Узел умножения на постоянный коэффициент

Узел умножения пневмосигнала на постоянный коэффициент строится на основе элемента сравнения и дроссельных сумматоров с регулируемыми коэффициентами передачи (рис.3.3). Дроссельный сумматор $\alpha_1\beta_1$ включен во входную цепь элемента сравнения и обеспечивает масштабирование пневмосигнала с коэффициентом передачи $K \leq 1$. Дроссельный сумматор $\alpha_2\beta_2$ включен в цепь обратной связи и обеспечивает масштабирование пневмосигнала с коэффициентом передачи $K \geq 1$. Для вывода статической характеристики узла обозначим давления во входных камерах элемента сравнения через P_B и P_B . Согласно (2.9) эти давления будут, соответственно, равны:

$$P_B = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1} P_{вх}; \quad P_B = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2} P_{вых}. \quad (3.1)$$

В статике $P_B = P_B$, следовательно

$$P_{вых} = \frac{\alpha_1(\alpha_2 + \beta_2)}{\alpha_2(\alpha_1 + \beta_1)} P_{вх} = KP_{вх}. \quad (3.2)$$

Настройка масштабного коэффициента K производится в двух поддиапазонах: при полностью закрытом дросселе β_2 $K = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1} \leq 1$, а при полностью открытым дросселе β_1 $K = 1 + \frac{\beta_2}{\alpha_2} \geq 1$. Динамика узла (с учетом конечного объема камер элемента сравнения) описывается структурной схемой (рис.3.4):

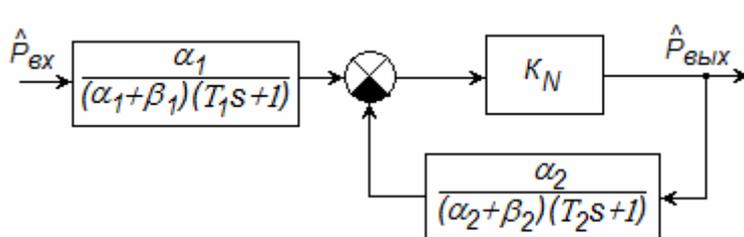


Рис.3.4. Структурная схема узла масштабирования

Здесь $T_1 = \frac{V_B M}{R\Theta(\alpha_1 + \beta_1)}$ и

$$T_2 = \frac{V_B M}{R\Theta(\alpha_2 + \beta_2)} \quad \square \quad \text{постоянные}$$

времена паразитных инерционных звеньев, образованных дроссельными

сумматорами и камерами элемента сравнения. Передаточная функция узла запишется, как:

$$W(s) = K \frac{(T_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)}. \quad (3.3)$$

Из соотношений (3.2) и (3.3) следует, что динамическая погрешность операции будет минимальной при $T_1 = T_2$. Такое равенство возможно при значениях коэффициента K близких к единице.

В некоторых случаях (для достижения $K \gg 1$) узел масштабирования пневмосигнала строится на основе альтернативной симметричной схемы (рис.1.9). Для улучшения линейности статической характеристики в дроссельных сумматорах используют линейные пульсирующие дроссели.

3.2. Узлы динамических преобразований пневмосигналов

Наиболее типичными динамическими операциями над пневмосигналами являются демпфирование, интегрирование и дифференцирование. Узел демпфирования (обратного предварения) строится по схеме, представленной на рис. 3.5. Узел представляет собой элемент сравнения, работающий в режиме

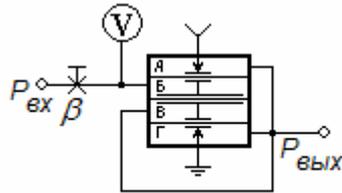


Рис.3.5. Узел демпфирования

повторителя, с инерционным звеном на входе.

Уравнение динамики узла:

$$T \frac{dP_{\text{вых}}}{d\tau} + P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}}, \quad (3.4)$$

где $T = \frac{VM}{R\Theta\beta}$ – постоянная времени инерционного звена, включающего дроссель β и емкость V . Передаточная функция узла в соответствии с (3.4) выглядит, как:

$$W(s) = \frac{1}{Ts + 1}. \quad (3.5)$$

Операция демпфирования используется для введения инерционности в алгоритм преобразования сигнала, например, при преобразовании ПИ-алгоритма регулирования в И-алгоритм.

Узел интегрирования пневмосигналов (рис.3.6) обрабатывает следующее уравнение динамики:

$$P_{\text{вых}} = \frac{1}{T_u} \int_0^t (P_{\text{вх1}} - P_{\text{вх2}}) d\tau + P_{\text{вых}}(0), \quad (3.6)$$

где $P_{\text{вх1}}$ и $P_{\text{вх2}}$ – входные давления узла, T_u – настроечный параметр узла, называемый **временем интегрирования**, и $P_{\text{вых}}(0)$ – константа интегрирования. В пневматической

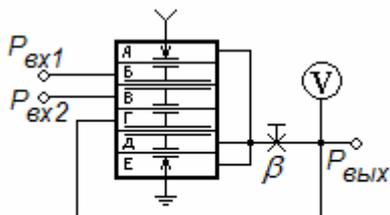


Рис.3.6. Узел интегрирования разности двух сигналов

технике всегда необходимо интегрировать разность двух пневмосигналов, так как интегрирование индивидуальных сигналов приводит к быстрому насыщению узла и потере работоспособности. Узел представляет собой пятимембранный элемент сравнения, охваченный двумя

обратными связями – жесткой отрицательной в камеру «Д» и инерционной

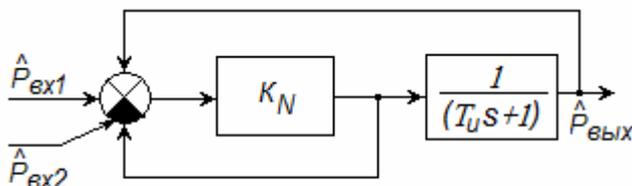


Рис.3.7. Структурная схема узла интегрирования разности двух сигналов

положительной в камеру «Г». Отрицательная обратная связь стабилизирует коэффициент передачи элемента сравнения, а положительная – обеспечивает интегрирование разности входных сигналов. Структурная схема узла, изображенная на рис.3.7, включает в себя

пропорциональное звено с коэффициентом передачи K_N (элемент сравнения) и инерционное звено (дроссель β и емкость V). Согласно данной структурной схеме передаточная функция узла по каналу $(P_{\text{вх1}} - P_{\text{вх2}}) \rightarrow P_{\text{вых}}$ имеет вид:

$$W(s) = \frac{K_N \cdot \frac{1}{1 + K_N T_u s + 1}}{1 - \frac{K_N \cdot \frac{1}{1 + K_N T_u s + 1}}{1 + K_N T_u s + 1}} \text{ или, после преобразований, } W(s) = \frac{1}{T_u s}. \quad (3.7)$$

Таким образом, узел интегрирования выполняет заданную функцию без существенной динамической погрешности.

Постоянная времени T_u (время интегрирования) настраивается с помощью регулируемого дросселя β : $T_u = \frac{VM}{R\Theta\beta}$. Если на вход узла подать ступенчатое воздействие $(P_{ex1} - P_{ex2})$, то выходное давление будет изменяться по

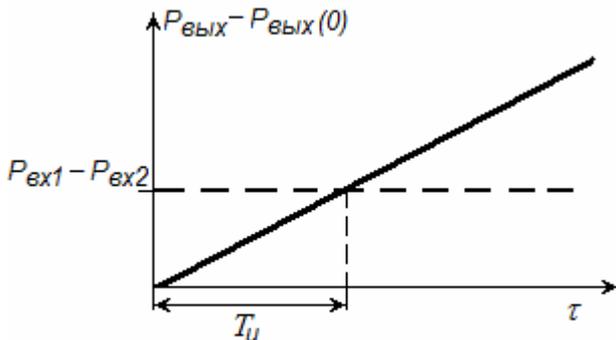


Рис.3.8. Реакция интегратора на ступенчатый входной сигнал

линейному закону (рис.3.8):

$$P_{вых} = P_{вых}(0) + \frac{(P_{вх1} - P_{вх2})}{T_u} \tau. \quad (3.8)$$

Из уравнения (3.8) и рис.3.8 следует, что за время T_u выходное давление интегратора изменится на величину $P_{вх1} - P_{вх2}$. Итак, настроечный параметр узла – время интегрирования – представляет собой промежуток времени, в течение которого выходное давление узла изменяется на ве-

личину ступенчатого входного воздействия.

Пневматические узлы дифференцирования обрабатывают следующее уравнение динамики:

$$P_{вых} = T_\partial \frac{dP_{вх}}{d\tau} + \Delta P_{см}, \quad (3.9)$$

где T_∂ - настроечный параметр узла, называемый временем дифференцирования, и $\Delta P_{см}$ – положительное давление смещения, обеспечивающее работоспособность узла при уменьшении входного давления. В пневматических системах регулирования используют два варианта операции дифференцирования. Первый (операция предварения) реализуется при $\Delta P_{см} = P_{вх}$, то есть:

$$P_{вых} = T_n \frac{dP_{вх}}{d\tau} + P_{вх}. \quad (3.10)$$

Настроечный параметр узла T_n в этом случае называют **временем предварения**.

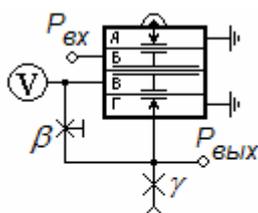


Рис.3.9. Узел предварения

Второй вариант (используется значительно реже) обрабатывается при постоянном давлении смещения $\Delta P = P_0$. Принципиальная схема узла предварения приведена на рис.3.9. Симметрично включенный элемент сравнения охвачен инерционной отрицательной обратной связью в камеру «В». Для улучшения помехозащищенности узла здесь применена схема с пониженным коэффициентом передачи (аналогично рис.2.9,а). Время

предварения определяется постоянной времени инерционного звена и настраивается с помощью регулируемого дросселя β . Структурная схема узла, приведенная на рис. 3.10, включает в себя пропорциональное звено с коэффициентом передачи K_N (элемент сравнения) и инерционное звено (дроссель β и емкость V). Передаточная функция узла, согласно рис.3.10, имеет вид:

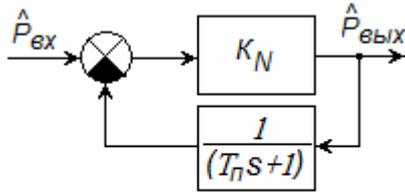


Рис.3.10. Структурная схема узла предварения

$$W(s) = \frac{K_N}{1 + \frac{K_N}{T_n s + 1}} = T_n s + 1. \quad (3.11)$$

Из соотношения (3.11) следует, что узел выполняет заданную операцию без существенной динамической погрешности.

Если подать на вход узла предварения линейно изменяющееся давление $P_{вх} = k\tau$, то выходное давление будет изменяться в соответствии с соотношением $P_{вых} = T_n k + k\tau$ (рис.3.11). Из рисунка можно заключить, что время предварения T_n – это промежуток времени, на который выходной сигнал узла предварения опережает линейно изменяющийся входной сигнал.

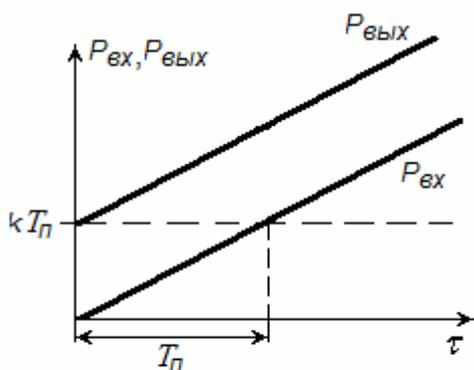


Рис.3.11. Реакция узла предварения на линейно изменяющийся входной сигнал

Узел, обрабатывающий операцию дифференцирования с постоянным смещением, строится на основе узла предварения (рис.3.12). Сумматор на пятимембранном элементе сравнения вычитает из выходного давления узла предварения входное давление и суммирует результат с давлением смещения P_0 . Динамика узла дифференцирования аналогична динамике узла предварения. Помехозащищенность узлов предварения и дифференцирования невысока, поэтому для их стабильной работы необходима тщательная фильтрация входного сигнала и стабилизация давления питания.

предварения входное давление и суммирует результат с давлением смещения

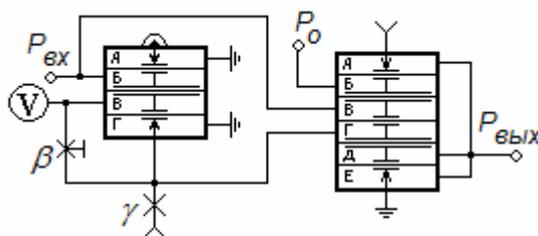


Рис.3.12. Узел дифференцирования пневмосигнала

Узел, обрабатывающий операцию дифференцирования с постоянным смещением, строится на основе узла предварения (рис.3.12). Сумматор на пятимембранном элементе сравнения вычитает из выходного давления узла предварения входное давление и суммирует результат с давлением смещения P_0 . Динамика узла дифференцирования аналогична динамике узла предварения. Помехозащищенность узлов предварения и дифференцирования невысока, поэтому для их стабильной работы необходима тщательная фильтрация входного сигнала и стабилизация давления питания.

3.3. Генераторы пневматических сигналов

Генераторы пневматических сигналов, в основном, используются для формирования линейно изменяющегося давления и прямоугольных колебаний давления. Генераторы линейно изменяющегося давления строятся на основе стабилизатора расхода (рис.3.13). Стабилизатор расхода поддерживает разность давлений $P_1 - P_2$ на уровне давления сдвига $P_1 - P_2 = \pm \Delta$, следовательно, расход воздуха через дроссель β будет, согласно (2.3) равен $G = \beta \Delta$.

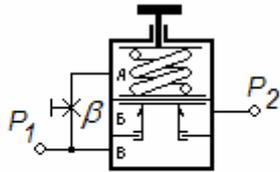


Рис.3.13. Стабилизатор расхода

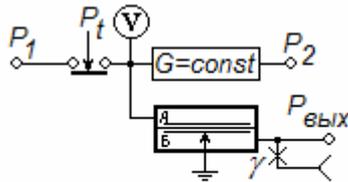


Рис.3.14. Генератор линейно убывающего давления

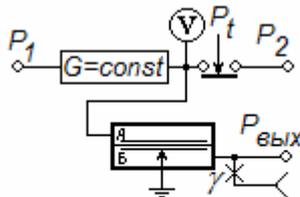


Рис.3.15. Генератор линейно возрастающего давления

управляемый клапан замкнут и давление в емкости (и на выходе узла) равно P_2 . При поступлении командного сигнала P_t клапан размыкается, и емкость начинает заполняться через стабилизатор расхода. При этом давление в емкости будет изменяться по линейному закону:

$$P_{вых} = P_2 + \frac{\Delta}{T} \tau. \quad (3.13)$$

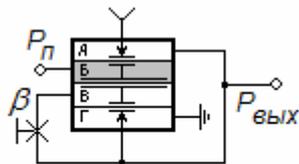


Рис.3.16. Генератор прямоугольных колебаний давления

Если на входе стабилизатора расхода установить емкость с управляемым клапаном, то получим генератор линейно убывающего давления (рис.3.14). В исходном состоянии управляемый клапан замкнут и давление в емкости (и на выходе узла) равно P_1 . При поступлении командного сигнала P_t клапан размыкается, и емкость начинает опорожняться через стабилизатор расхода. При этом давление в емкости будет изменяться по линейному закону:

$$P_{вых} = P_1 - \frac{\Delta}{T} \tau, \quad (3.12)$$

где T – постоянная времени инерционного звена, образованного емкостью V и дросселем β в стабилизаторе расхода. Выходное давление узла снимается через маломощный повторитель для устранения влияния нагрузки на динамику узла.

Если емкость с управляемым клапаном установить на выходе стабилизатора расхода, то получим генератор линейно возрастающего давления (рис.3.15). В исходном состоянии

управляемый клапан замкнут и давление в емкости (и на выходе узла) равно P_2 . При поступлении командного сигнала P_t клапан размыкается, и емкость начинает заполняться через стабилизатор расхода. При этом давление в емкости будет изменяться по линейному закону:

Генератор прямоугольных колебаний давления строится на основе трехмембранного реле (рис.3.16). Реле включено по схеме с малым подпором. При подаче давления питания реле устанавливается в состояние «1», камера «В» начинает заполняться через дроссель β , и давление P_B будет расти по экспоненциальному закону. При достижении давления переключения (см.1.28) реле установится в состояние «0» и давление P_B начнет падать по экспоненциальному закону до достижения величины $P_{п}$. Далее цикл повторяется, и на выходе реле формируются прямоугольные колебания давления с амплитудой, близкой к давлению питания.

Период колебаний t можно определить из соотношения:

$$t = -2T \ln \frac{F - 2f}{F - f}, \quad (3.14)$$

где T – постоянная времени инерционного звена, образованного камерой «В» и дросселем β , а F и f – эффективные площади мембран с большим и малым жестким центром.

4. Пневматические регуляторы

Пневматические регуляторы представляют собой информационно совместимые по входу и выходу функциональные блоки, каждый из которых формирует индивидуальный алгоритм регулирования. Пневморегуляторы агрегатного комплекса «СТАРТ» конструктивно совместимы с показывающими и самопишущими вторичными измерительными приборами.

Агрегатный комплекс «СТАРТ» включает в себя следующие типы пневматических регуляторов:

- позиционный регулятор ПР1.5.М1;
- пропорциональный регулятор ФР0098;
- пропорционально-интегральный регулятор ФР0091;
- пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор ФР0095;
- регуляторы соотношения ПР3.33М1 и ПР3.34.М1.

На принципиальных пневматических схемах и схемах подключения принята следующая нумерация штуцеров: 1 – аналоговый выход; 2 – аналоговый вход; 3 – дискретный вход/выход; 4 – питание; 5 – задание (внутреннее), контроль; 6 – задание (внешнее); 7 – выход на исполнительное устройство.

4.1. Позиционный регулятор ПР1.5.М1

Регулятор ПР1.5.М1 (рис.4.1) состоит из задатчика I, переключателя вида действия II, элемента сравнения III и усилителя мощности IV. Действие регулятора основано на сравнении входного давления $P_{пер}$ с давлением задания, формируемым задатчиком I.

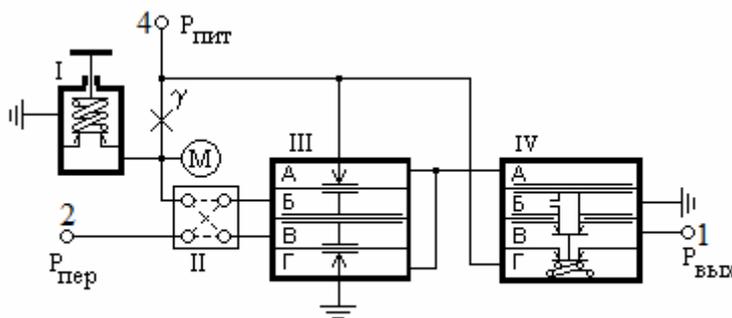


Рис4.1. Позиционный регулятор ПР1.5.М1

Переключатель II обеспечивает прямое действие регулятора:

$$P_{вых} = P_{пит} \text{ при } P_{пер} > P_{зад}$$

$$P_{вых} = 0 \text{ при } P_{пер} < P_{зад}$$

при прямом соединении каналов и обратное действие:

$$P_{вых} = P_{пит} \text{ при } P_{пер} < P_{зад}$$

$$P_{вых} = 0 \text{ при } P_{пер} > P_{зад}$$

при перекрестном соедине-

нии. Элемент сравнения III отрабатывает статическую характеристику вида (1.19) и может рассматриваться как релейный элемент с достаточно малыми зонами нечувствительности и возврата. Усилитель мощности IV обеспечивает необходимый расход воздуха на выходе регулятора.

Регуляторы, реализующие такой закон регулирования, имеют достаточно большую инерционность, поэтому их рекомендуется применять на объектах с самовыравниванием, для которых отношение времени запаздывания к постоянной времени объекта больше 0,2.

Динамическая погрешность регулятора может быть вызвана ограниченным быстродействием элемента сравнения и усилителя мощности. Обычно эта погрешность не превышает 1% при скорости изменения входного сигнала менее $0,8 \cdot 10^5$ Па/с.

4.2. П - регулятор ФР0098

Регулятор ФР0098 обрабатывает следующий закон регулирования:

$$P_{вых} = K_p (P_{пер} - P_{зад}) + P_{вых}(0), \quad (4.1)$$

где $P_{пер}$ и $P_{зад}$ – входные давления, пропорциональные, соответственно, текущему и заданному значениям регулируемого параметра, K_p – коэффициент передачи регулятора и $P_{вых}(0)$ – давление контрольной точки. **Под контрольной точкой понимают выходное давление регулятора, соответствующее равенству $P_{пер} = P_{зад}$.** Принципиальная схема регулятора приведена на

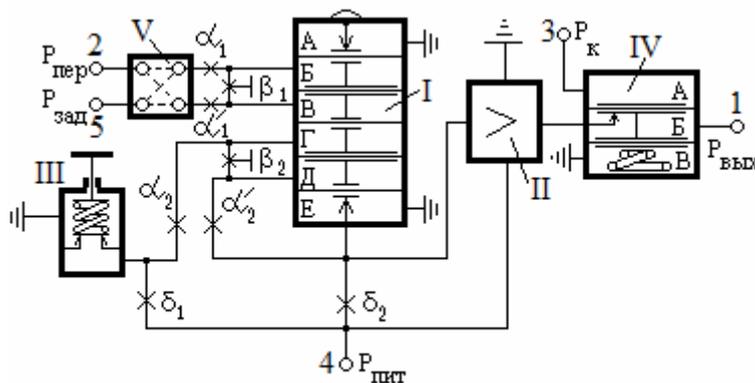


Рис.4.2. Принципиальная схема ФР0098

рис.4.2. Регулятор включает в себя: элемент сравнения I, усилитель мощности II, датчик контрольной точки III, отключающее реле IV и переключатель вида действия V. Элемент сравнения I совместно с дроссельными делителями $\alpha_1 \alpha_1' \beta_1$ и $\alpha_2 \alpha_2' \beta_2$ формирует статическую характеристику регулятора.

Данный элемент включен по альтернативной симметричной схеме для обеспечения устойчивости при высоких значениях K_p . Усилитель мощности II обеспечивает необходимый расход воздуха на выходе регулятора. С помощью датчика III устанавливают давление контрольной точки $P_{вых}(0)$. Отключающее реле IV блокирует выход регулятора при переводе системы регулирования в режим ручного дистанционного управления. Переключатель вида действия V обеспечивает прямое действие регулятора (рост $P_{вых}$ при увеличении входного рассогласования $P_{пер} \square P_{зад}$) при прямом соединении входных линий и обратное действие (снижение $P_{вых}$ при увеличении входного рассогласования $P_{пер} \square P_{зад}$) при перекрестном соединении. Отключающее реле IV управляется внешним дискретным командным сигналом $P_к$. При $P_к = 0$ мембранный блок реле находится в верхнем положении, клапан в камере «Б» открыт и выход усилителя мощности соединен с выходным штуцером регулятора. Для блокировки выхода регулятора подается сигнал $P_к = P_{пит}$, мембранный блок переходит в нижнее положение и клапан в камере «Б» закрывается.

Для анализа статики и динамики регулятора принципиальная схема может быть упрощена путем исключения вспомогательных элементов II, III, IV и V. Упрощенная схема регулятора ФР0098 представлена на рис.4.3.

Статическая характеристика регулятора находится путем решения системы уравнений (4.2), где коэффициенты $K_1 \div K_8$ (исходя из равенства проводимостей $\alpha_1 = \alpha_1'$ и $\alpha_2 = \alpha_2'$) имеют следующие значения:

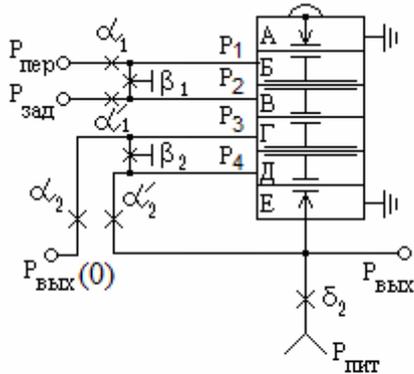


Рис.4.3. Упрощенная схема регулятора ФР0098.

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= K_1 P_{пер} + K_2 P_2; \\ P_2 &= K_3 P_{зад} + K_4 P_1; \\ P_3 &= K_5 P_{вых(0)} + K_6 P_4; \\ P_4 &= K_7 P_{вых} + K_8 P_3; \\ P_1 - P_2 + P_3 - P_4 &= 0; \end{aligned} \right\} (4.2)$$

где

$$K_1 = K_3 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1}; \quad K_2 = K_4 = \frac{\beta_1}{\alpha_1 + \beta_1};$$

$$K_5 = K_7 = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2}; \quad K_6 = K_8 = \frac{\beta_2}{\alpha_2 + \beta_2}.$$

В окончательном виде статическая характеристика ФР0098 соответствует уравнению (4.3):

$$P_{вых} = \frac{\alpha_1(\alpha_2 + 2\beta_2)}{\alpha_2(\alpha_1 + 2\beta_1)}(P_{пер} - P_{зад}) + P_{вых(0)}. \quad (4.3)$$

При сопоставлении уравнений (4.1) и (4.3) можно заключить, что коэффициент передачи K_p определяется проводимостями дросселей в дроссельных делителях, как:

$$K_p = \frac{\alpha_1(\alpha_2 + 2\beta_2)}{\alpha_2(\alpha_1 + 2\beta_1)}. \quad (4.4)$$

Установка нужного значения K_p производится с помощью регулируемых дросселей β_1 и β_2 в двух поддиапазонах: $K_p \leq 1$ при полностью закрытом дросселе β_2 (при $\beta_2=0$) и $K_p \geq 1$ при полностью закрытом дросселе β_1 (при $\beta_1=0$).

В практике в качестве настроечного параметра П-регулятора обычно используют не коэффициент передачи K_p , а его обратную величину – **предел пропорциональности** δ (иногда этот параметр называют **диапазоном дросселирования**):

$$\delta = \frac{1}{K_p} \cdot 100\%. \quad (4.5)$$

Под пределом пропорциональности понимают изменение регулируемого параметра (в процентах относительно предела измерения датчика), при котором регулятор перемещает исполнительное устройство из одного крайнего положения в другое.

Изменением проводимостей дросселей β_1 и β_2 можно устанавливать предел пропорциональности δ в диапазоне от 2% до 3000%.

Анализ динамики регулятора ФР0098 с учетом паразитных инерционных звеньев, образуемых дроссельными делителями $\alpha_1\alpha_1'\beta_1$, $\alpha_2\alpha_2'\beta_2$ и камерами элемента сравнения I, приводит к структурной схеме, изображенной на рис.4.4. Постоянные времени $T_1 \div T_4$ определяются из следующих соотноше-

ний: $T_1 = T_2 = \frac{V_k M}{R\Theta(\alpha_1 + \beta_1)}$ и $T_3 = T_4 = \frac{V_k M}{R\Theta(\alpha_2 + \beta_2)}$, где V_k – объем камеры

элемента сравнения.

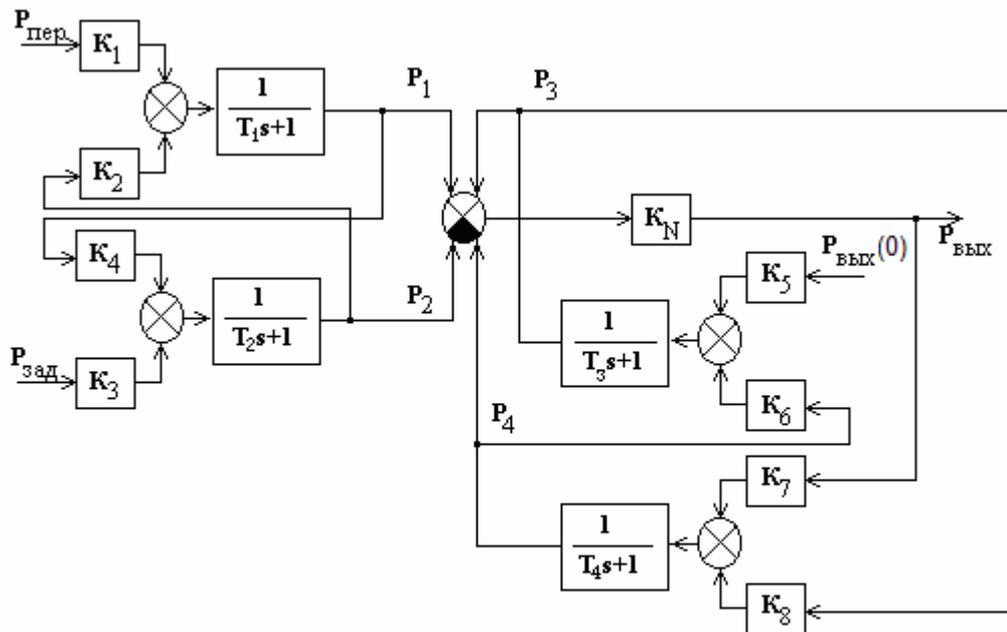


Рис.4.4. Структурная схема регулятора ФР0098

Свертка данной структурной схемы дает следующую передаточную функцию по каналу $P_{пер} - P_{зад} \rightarrow P_{вых}$:

$$W(s) = \frac{K_1(1+K_6)}{K_5(1+K_2)} \cdot \frac{(T_{oc}s+1)}{(T_{ex}s+1)}, \quad (4.6)$$

где $T_{ex} = \frac{T_1}{1+K_2}$ и $T_{oc} = \frac{T_3}{1+K_6}$. Балластная составляющая передаточной

функции описывает динамическую погрешность реализации закона регулирования (4.1). Очевидно, при $T_{oc} \gg T_{ex}$ регулятор будет обладать некоторыми дифференцирующими свойствами, а при $T_{oc} \ll T_{ex}$ – инерционными свойства-

ми. Минимальная динамическая погрешность будет наблюдаться при $T_{oc}=T_{ex}$, что соответствует равенству $\beta_1=\beta_2$ или, согласно (4.4), при $K_p=1$.

4.2. ПИ - регулятор ФР0091

Регулятор ФР0091 обрабатывает следующий закон регулирования с независимыми настроечными параметрами:

$$P_{вых} = K_p (P_{пер} - P_{зад}) + \frac{1}{T_u} \int_0^t (P_{пер} - P_{зад}) d\tau + P_{вых}(0), \quad (4.7)$$

где $P_{пер}$ и $P_{зад}$ – входные давления, пропорциональные, соответственно, текущему и заданному значениям регулируемого параметра, K_p – коэффициент передачи регулятора, T_u – время интегрирования и $P_{вых}(0)$ – константа интегрирования, играющая роль контрольной точки. Принципиальная схема регулятора приведена на рис.4.5. Регулятор включает в себя элементы сравнения I и II, маломощный повторитель без сдвига III, усилитель мощности IV, отключающие реле V и VI и переключатель вида действия VII. Элемент сравнения I совместно с инерционным звеном β_3 обрабатывает интегральную составляющую закона регулирования. Элемент сравнения II обрабатывает пропорциональную составляющую закона регулирования и суммирует ее с интегральной. Данный элемент включен по альтернативной симметричной схеме для обеспечения устойчивости при высоких значениях K_p . Повторитель III отделяет выход узла интегрирования от входа узла умножения на постоянный коэффициент с целью

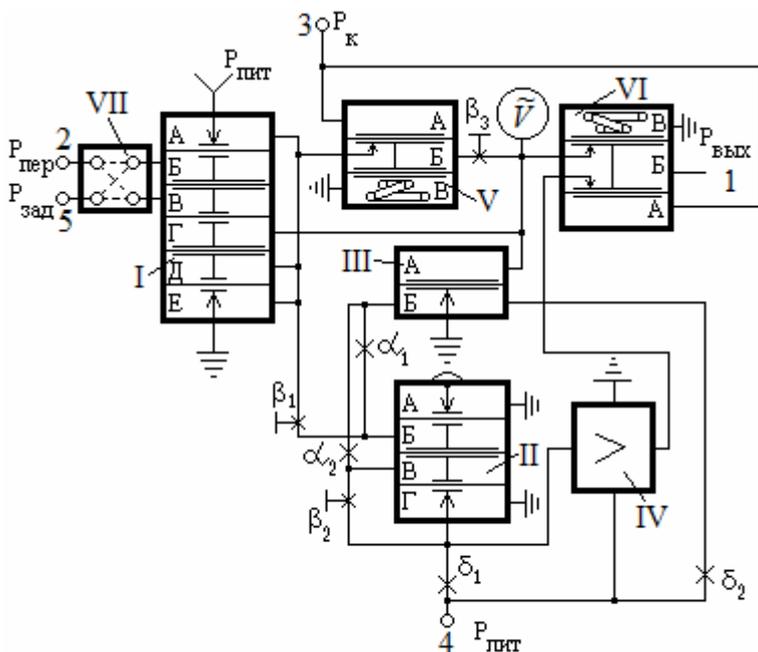


Рис.4.5. Принципиальная схема регулятора ФР0091

устранения взаимного влияния настроечных параметров K_p и T_u . Усилитель мощности IV обеспечивает необходимый расход воздуха на выходе регулятора. При отключении регулятора отключающее реле V размыкает положительную обратную связь в элементе сравнения I и, таким образом, прекращает интегрирование входного рассогласования. В это время отключающее реле VI блокирует выход усилителя мощности IV и подключает выходной штуцер регулятора к емкости C для запоминания давления $P_{вых}(0)$ при переключении режимов работы системы регулирования. Переключатель вида действия VII обеспечивает прямое действие регулятора (рост $P_{вых}$ при увеличении входно-

го рассогласования $P_{пер} \square P_{зад}$) при прямом соединении входных линий и обратное действие (снижение $P_{вых}$ при увеличении входного рассогласования $P_{пер} \square P_{зад}$) при перекрестном соединении.

Для анализа динамики регулятора принципиальная схема может быть упрощена путем исключения вспомогательных элементов III, IV, V, VI и VII. Упрощенная схема регулятора ФР0091 представлена на рис.4.6.

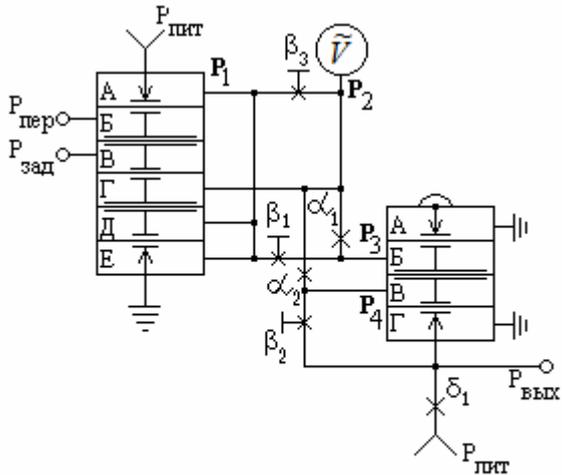


Рис.4.6. Упрощенная схема регулятора ФР0091

Анализ динамики регулятора с учетом паразитных инерционных звеньев, образованных дроссельными сумматорами $\alpha_1\beta_1$, $\alpha_2\beta_2$ и входными камерами элемента сравнения, приводит к структурной схеме, представленной на рис.4.7. На структурной схеме ФР0091 приняты следующие обозначения:

$$K_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1}; \quad K_2 = \frac{\beta_1}{\alpha_1 + \beta_1};$$

$$K_3 = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2}; \quad K_4 = \frac{\beta_2}{\alpha_2 + \beta_2};$$

$$T_1 = \frac{V_k M}{R\Theta(\alpha_1 + \beta_1)}; \quad T_2 = \frac{V_k M}{R\Theta(\alpha_2 + \beta_2)},$$

и $T_u = \frac{\tilde{V}M}{R\Theta\beta_3}$, где V_k – объем входной камеры элемента сравнения и $\square \square$ – объем пневмодомкости.

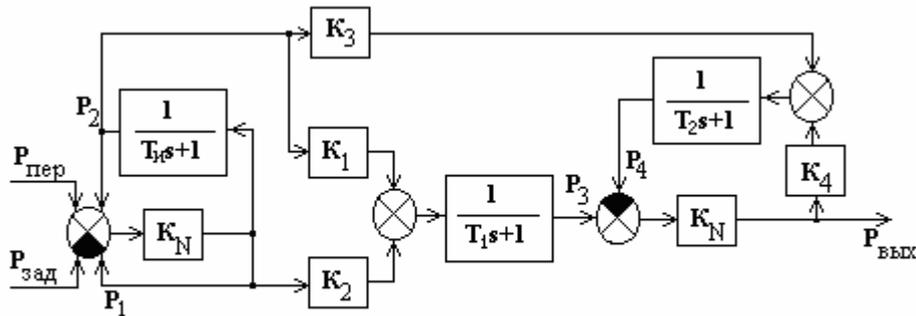


Рис.4.7. Структурная схема регулятора ФР0091

Свертка данной структурной схемы дает следующую передаточную функцию по каналу $P_{пер} - P_{зад} \rightarrow P_{вых}$:

$$W(s) = \left[\frac{K_2}{K_4} (T_{эkv} s + 1) + \frac{1}{T_u s} \right] \frac{1}{T_1 s + 1}, \quad (4.8)$$

где $T_{эkv} = \frac{T_2 T_u}{T_2 + T_u}$. Если в уравнении (4.8) пренебречь паразитными инерционностями ($T_1 = T_2 = 0$), то оно превращается в передаточную функцию идеального ПИ-регулятора:

$$W(s) = \frac{K_2}{K_4} + \frac{1}{T_u s}. \quad (4.9)$$

Из уравнений (4.8), (4.9) следует, что настроечный параметр $K_p = \frac{K_2}{K_4}$ определяется проводимостями регулируемых дросселей β_1 и β_2 :

$$K_p = \frac{\beta_1(\alpha_2 + \beta_2)}{\beta_2(\alpha_1 + \beta_1)}. \quad (4.10)$$

С учетом того, что проводимость полностью открытого регулируемого дросселя намного превышает проводимость постоянного дросселя ($\beta^{max} \gg \alpha$), можно считать, что $\alpha + \beta^{max} \approx \beta^{max}$. В таком случае диапазон настройки K_p можно разделить на два поддиапазона – при полностью открытом дросселе β_1

$$K_p = 1 + \frac{\alpha_2}{\beta_2} \geq 1 \text{ и при полностью открытом } \beta_2 \square K_p = \frac{\beta_1}{\alpha_1 + \beta_1} \leq 1. \text{ Изменением}$$

проводимостей дросселей β_1 и β_2 можно устанавливать предел пропорциональности δ в диапазоне от 2% до 3000%. Изменением проводимости дросселя β_3 можно устанавливать время интегрирования T_u в диапазоне от 0,05 до 100 минут.

Из (4.8) можно заключить, что в передаточной функции регулятора

ФР0091 есть две балластных составляющих: $\frac{T_{эКВ} s + 1}{T_1 s + 1}$ для пропорциональной

составляющей закона регулирования и $\frac{1}{T_1 s + 1}$ для интегральной составляющей.

Очевидно, минимальная динамическая погрешность реализации закона регулирования будет наблюдаться при минимальных значениях постоянных времени T_1 и T_2 , что соответствует полному открытию дросселей β_1 и β_2 и, согласно (4.10), $K_p = 1$.

4.4. ПИД - регулятор ФР0095

Регулятор ФР0095 обрабатывает следующий закон регулирования с независимыми настроечными параметрами:

$$P_{вых} = K_p (P_{пер} - P_{зад}) + \frac{1}{T_u} \int_0^t (P_{пер} - P_{зад}) d\tau + K_p T_n \frac{dP_{пер}}{d\tau} + P_{вых}(0), \quad (4.11)$$

где $P_{пер}$ и $P_{зад}$ – входные давления, пропорциональные, соответственно, текущему и заданному значениям регулируемого параметра, K_p – коэффициент передачи регулятора, T_u – время интегрирования T_n – время предварения и $P_{вых}(0)$ – константа интегрирования, играющая роль контрольной точки.

Принципиальная схема регулятора приведена на рис.4.8. Регулятор включает в себя элементы сравнения I, II и III, маломощный повторитель IV,

усилитель мощности V, отключающие реле VI, VII и VIII, переключатели вида действия IX и X. Элемент сравнения I совместно с инерционным звеном $\beta_3 \square_1$ обрабатывает интегральную составляющую закона регулирования.

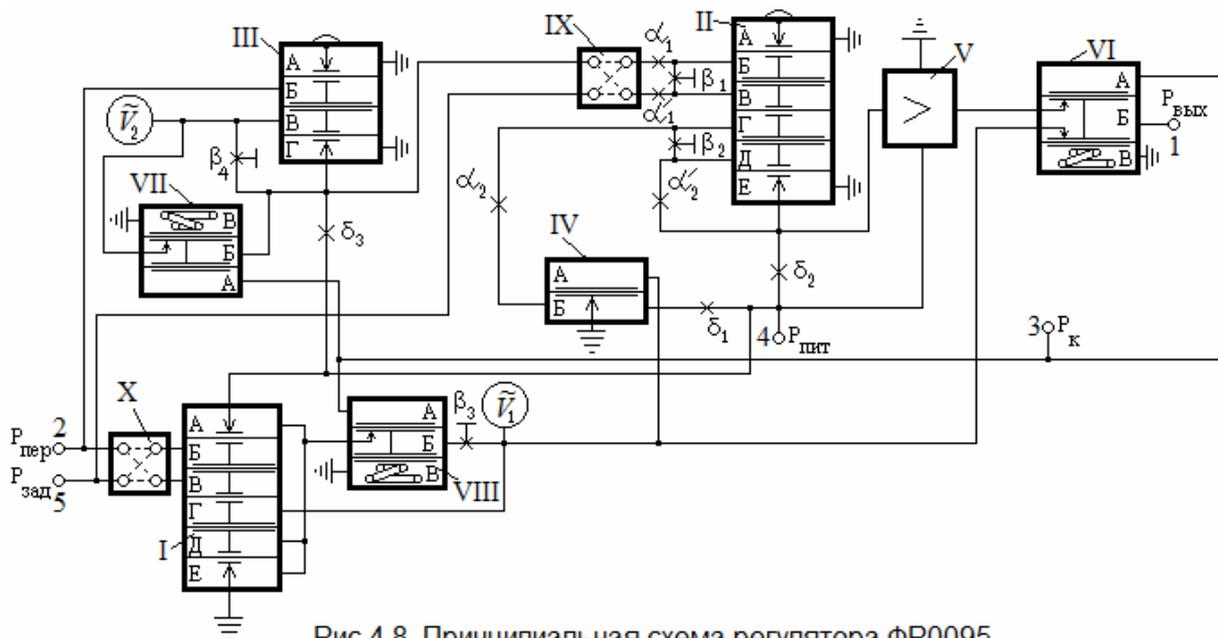


Рис.4.8. Принципиальная схема регулятора ФР0095

Элемент сравнения III совместно с инерционным звеном $\beta_4 \square_2$ обрабатывает дифференциальную составляющую закона регулирования. Элемент сравнения II обрабатывает пропорциональную составляющую закона регулирования и суммирует ее с интегральной и дифференциальной составляющими. Повторитель IV отделяет выход узла интегрирования от входа узла умножения на постоянный коэффициент с целью устранения взаимного влияния настроечных параметров K_p и T_u . Усилитель мощности V обеспечивает необходимый расход воздуха на выходе регулятора. При отключении регулятора отключающее реле VIII размыкает положительную обратную связь в элементе

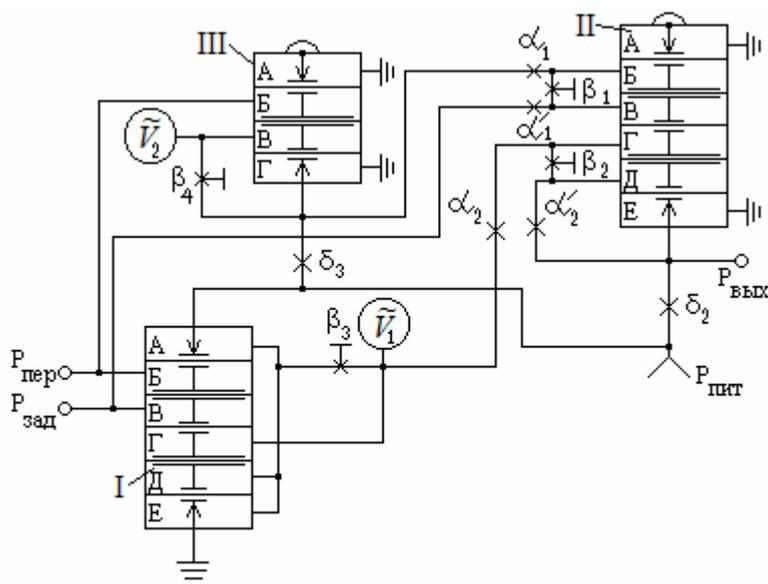


Рис.4.9. Упрощенная схема регулятора ФР0095

сравнения I и, таким образом, прекращает интегрирование входного рассогласования. В это время отключающее реле VI блокирует выход усилителя мощности V и подключает выходной штуцер регулятора к емкости \square_1 для запоминания давления $P_{вых}(0)$ при переключении режимов работы системы регулирования. Отключающее реле VII при отключении регулятора шунтирует

мостей дросселей β_1 и β_2 можно устанавливать предел пропорциональности δ в диапазоне от 2% до 3000%. Величина T_u изменяется с помощью дросселя β_3 в диапазоне $0,05 \text{ мин} \leq T_u \leq 100 \text{ мин}$. Величина T_n изменяется с помощью дросселя β_4 в диапазоне $0,05 \text{ мин} \leq T_u \leq 10 \text{ мин}$.

4.5. Регуляторы соотношения ПР3.33-М1 и ПР3.34-М1

Регуляторы соотношения обеспечивают пропорциональную зависимость между значениями двух технологических параметров путем воздействия на один из них. Принцип работы контура регулирования соотношения иллюстрирует рис.4.11.

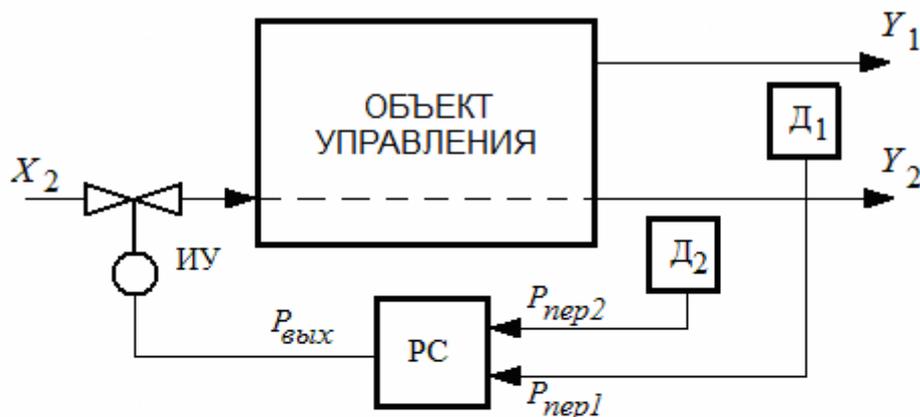


Рис.4.11. Контур регулирования соотношения:
 Y_1 - ведущий (независимый) параметр;
 Y_2 - ведомый (зависимый) параметр;
 X_2 - регулирующая переменная ведомого параметра;
 D_1, D_2 - датчики;
 РС - регулятор соотношения;
 ИУ - исполнительное устройство

Регулятор соотношения формирует регулирующее воздействие, которое в статике обеспечивает равенство

$$\frac{Y_2}{Y_1} = K_c, \quad (4.13)$$

где K_c – коэффициент соотношения. Для регулятора соотношения ПР3.33-М1 K_c является настроечным параметром, величина которого устанавливается органами ручной настройки. Принципиальная схема ПР3.33-М1 приведена на рис.4.12. Регулятор состоит из вычислительного и регулирующего узлов.

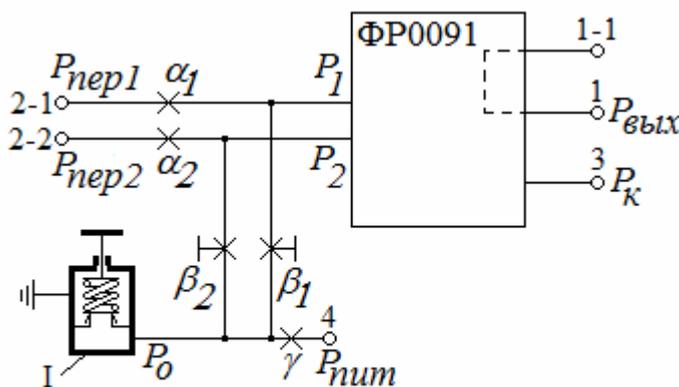


Рис.4.12. Регулятор соотношения ПР3.33.М1

Вычислительный узел включает в себя задатчик давления I и дроссельные сумматоры $\alpha_1\beta_1$ и $\alpha_2\beta_2$ с регулируемыми коэффициентами передачи. Выходные давления вычислительного узла P_1 и P_2 поступают на входы переменной и задания регулирующего узла, принципиальная схема которого аналогична регулятору ФР0091. Задатчик I формирует давление, соответствующее началу шкалы унифицированного пневмосигнала $P_o = 0,2 \text{ кгс/см}^2$.

Работа вычислительного узла характеризуется следующими уравнениями статики:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= K_1 P_{nep1} + K_2 P_o; \\ P_2 &= K_3 P_{nep2} + K_4 P_o, \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

где $K_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1}$; $K_2 = \frac{\beta_1}{\alpha_1 + \beta_1}$; $K_3 = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2}$; $K_4 = \frac{\beta_2}{\alpha_2 + \beta_2}$.

Поскольку $K_2 = 1 - K_1$ и $K_4 = 1 - K_3$, система (4.14) может быть представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= K_1 (P_{nep1} - P_o) + P_o; \\ P_2 &= K_3 (P_{nep2} - P_o) + P_o. \end{aligned} \right\}$$

В статике регулирующий узел стремится свести к нулю разность $P_1 - P_2$, следовательно,

$$K_1 (P_{nep1} - P_o) = K_3 (P_{nep2} - P_o), \quad \text{или} \quad \frac{P_{nep2} - P_o}{P_{nep1} - P_o} = \frac{K_1}{K_3} = K_c. \quad (4.15)$$

Вычитанием P_o из P_{nep1} и P_{nep2} обеспечивается пропорциональная зависимость не между пневматическими сигналами, а между параметрами Y_2 и Y_1 , начальные уровни которых считаются нулевыми. Подставив в (4.15) выражения для K_1 и K_3 , получим:

$$K_c = \frac{\alpha_1 (\alpha_2 + \beta_2)}{\alpha_2 (\alpha_1 + \beta_1)}. \quad (4.16)$$

Согласно (4.16), установка нужного значения K_c производится с помощью регулируемых дросселей β_1 и β_2 в двух поддиапазонах: $K_c \leq 1$ при полностью закрытом дросселе β_2 (при $\beta_2=0$) и $K_c \geq 1$ при полностью закрытом дросселе β_1 (при $\beta_1=0$). Настраиваемые органы ПР3.33-М1 позволяют изменять величину K_c в пределах от 0,1 до 10. Динамика регулятора ПР3.33-М1 полностью аналогична динамике ФР0091.

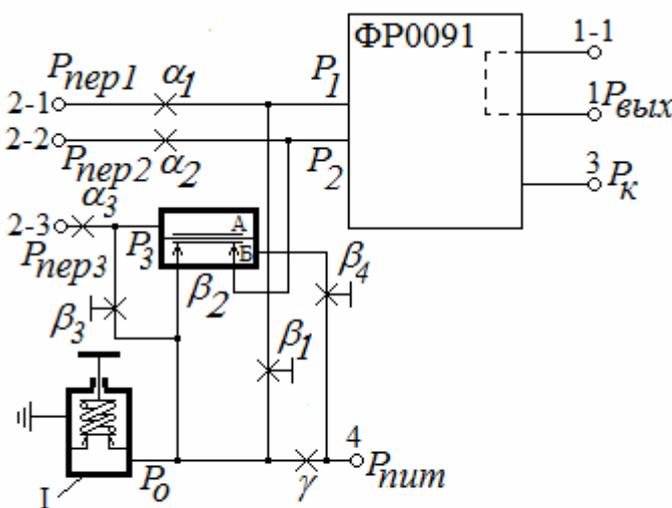


Рис. 4.13. Регулятор соотношения ПР3.34.М1

Для регулятора ПР3.34-М1 значение K_c определяется величиной корректирующего параметра $P_{перз}$. Принципиальная схема ПР3.34-М1 приведена на рис.4.13. В отличие от регулятора ПР3.33-М1 в данном регуляторе вместо регулируемого дросселя β_2 используется управляемый переменный дроссель, проводимость которого зависит от давления P_3 , величина которого определяется по аналогии с (4.14) из выражения:

$$P_3 = K_5(P_{перз} - P_o) + P_o,$$

где $P_{перз}$ – пневмосигнал от датчика корректирующего параметра, а

$K_5 = \frac{\alpha_3}{\alpha_3 + \beta_3}$. Проводимость дросселя β_2 является нелинейной функцией да-

вления P_3 . Чтобы приблизить эту зависимость к линейной, в камеру «Б» переменного дросселя β_2 подается питание через регулируемый дроссель β_4 . Коэффициент K_5 определяет степень влияния корректирующего параметра на коэффициент соотношения K_c . В остальном регулятор ПР3.34-М1 аналогичен регулятору ПР3.33-М1.

Регуляторы соотношения ПР3.33-М1 и ПР3.34-М1 имеют дополнительный выход 1-1, на который подается пневмосигнал с выхода усилителя мощности регулирующего узла до отключающего реле. К этому выходу подключается манометр, позволяющий провести выравнивание сигналов при переключении режимов работы системы регулирования.

5. Пневматические функциональные блоки

Функциональные блоки агрегатного комплекса «СТАРТ» выполняют алгебраические, временные и релейные преобразования пневмосигналов в системах регулирования и управления. Все функциональные блоки построены по сходному принципу и включают в себя два узла – типовой узел обработки пневмосигнала и усилитель мощности.

5.1. Прибор алгебраического суммирования ПФ1.1-М1

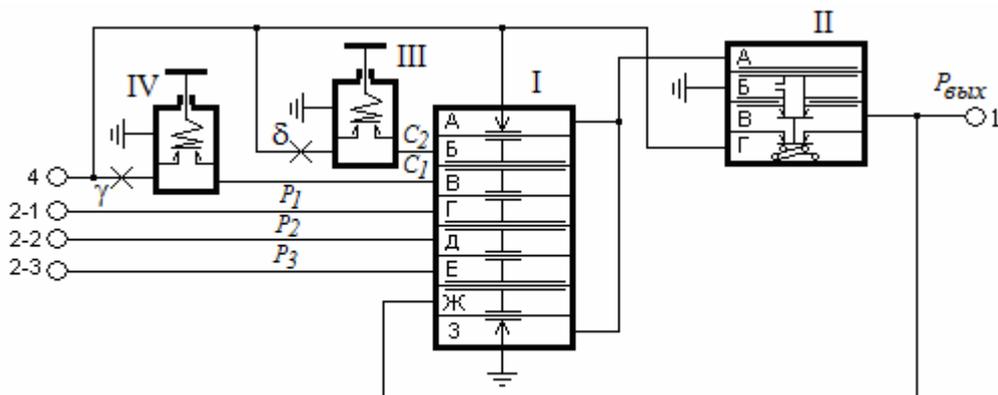


Рис.5.1. Принципиальная схема прибора ПФ1.1-М1

$$\left. \begin{aligned} P_2 &= K_1 P_{\text{вх}} + K_2 P_1 \\ P_1 &= K_3 P_0 + K_4 P_2 \end{aligned} \right\} \text{ или}$$

$$P_2 = \frac{K_1}{1 - K_2 K_4} P_{\text{вх}} + \frac{K_2 K_3}{1 - K_2 K_4} P_0, \quad (5.3)$$

где $K_1 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$; $K_2 = \frac{\beta}{\alpha + \beta}$; $K_3 = \frac{\gamma}{\beta + \gamma}$; $K_4 = \frac{\beta}{\beta + \gamma}$. Подставив выражения для этих коэффициентов в (5.3) с учетом равенства $P_{\text{вых}} = P_2$, получим:

$$P_{\text{вых}} = \frac{\alpha(\beta + \gamma)}{\alpha\beta + \alpha\gamma + \beta\gamma} (P_{\text{вх}} - P_0) + P_0. \quad (5.4)$$

Сопоставив уравнения (5.2) и (5.4), можно заключить, что при прямом соединении каналов переключателя IV масштабный коэффициент K будет определяться выражением:

$$K = \frac{\alpha(\beta + \gamma)}{\alpha\beta + \alpha\gamma + \beta\gamma} \leq 1, \quad (5.5)$$

причем, при полном закрытии дросселя β величина K будет равна 1.

При перекрестном соединении каналов переключателя IV коэффициент K настраивается в пределах $1 \leq K \leq 10$. Уравнение статики прибора, полученное аналогично уравнению (5.4), имеет вид:

$$P_{\text{вых}} = \left(1 + \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \right) (P_{\text{вх}} - P_0) + P_0. \quad (5.6)$$

В данном случае IV масштабный коэффициент K будет определяться выражением:

$$K = 1 + \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \geq 1. \quad (5.7)$$

Очевидно, что при полном закрытии дросселя β величина K будет равна 1.

Динамика прибора ПФ1.3.9-М1 будет существенным образом зависеть

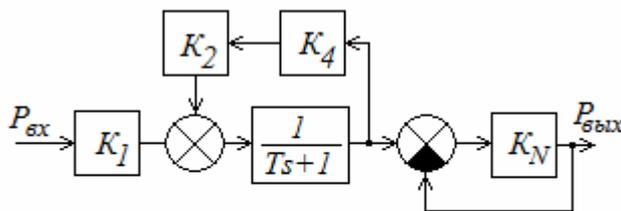


Рис.5.4. Структурная схема ПФ1.3.9-М1 при $K \leq 1$

от установленного диапазона настройки коэффициента K . При $K \leq 1$ структурная схема канала $P_{\text{вх}} \rightarrow P_{\text{вых}}$ будет иметь вид (рис.5.4). Постоянная времени T паразитного инерционного звена, образованного камерой «Б» элемента сравнения, дросселями α и β находится из соотношения:

отношения:

$T = \frac{V_k M}{R\Theta(\alpha + \beta)}$, где V_k – объем входной камеры элемента сравнения. Передаточная функция по данному каналу будет определяться соотношением:

$$W(s) = \frac{K_1}{Ts + 1 - K_2 K_4} \quad \text{или} \quad W(s) = \frac{K_1}{1 - K_2 K_4} \cdot \frac{1}{T_M s + 1}, \quad (5.8)$$

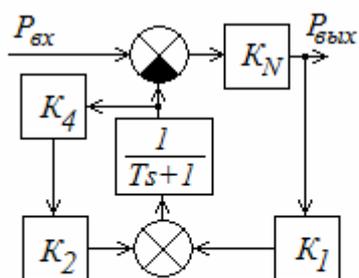


Рис.5.5. Структурная схема ПФ1.3.9-М1 при $K \geq 1$

где $T_M = \frac{T}{1 - K_2 K_4}$. При $K \geq 1$

структурная схема данного канала будет выглядеть иначе (рис.5.5). При этом передаточная функция по каналу $P_{вх} \rightarrow P_{вых}$ примет вид:

$$W(s) = \frac{1 - K_2 K_4}{K_1} \cdot (T_M s + 1). \quad (5.9)$$

Из анализа соотношений (5.8) и (5.9) можно сделать следующие выводы. При $K \leq 1$ динамическая погрешность операции масштабирования будет характеризоваться определенной инерционностью, в то время как при $K \geq 1$ прибор ПФ1.3.9-М1 будет обладать некоторыми дифференцирующими свойствами. В обоих случаях минимальная динамическая погрешность будет наблюдаться при максимальной проводимости дросселя β .

5.3. Прибор извлечения квадратного корня ПФ1.17-М1

Прибор ПФ1.17 предназначен для согласования линейных функциональных блоков и регуляторов с нелинейными (квадратичными) датчиками и преобразователями, в качестве которых обычно выступают расходомеры переменного перепада давления. Прибор реализует следующую зависимость выходного сигнала от входного:

$$P_{вых} = \sqrt{0,8(P_{вх} - 0,2) + 0,2}. \quad (5.10)$$

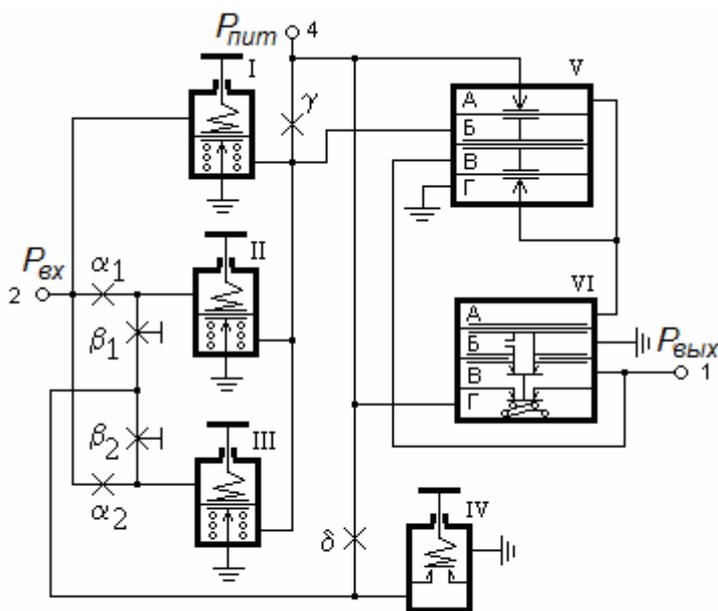


Рис.5.6. Принципиальная схема ПФ1.17-М1

Принципиальная схема ПФ1.17-М1 приведена на рис. 5.6.

Выходная функция аппроксимируется тремя отрезками прямых, начальные смещения которых задаются повторителями со сдвигом I, II и III, а наклоны – дроссельными сумматорами $\alpha_1 \beta_1$ и $\alpha_2 \beta_2$. Задатчик IV формирует начальный уровень выходного сигнала, а элемент сравнения V и грубый мощный повторитель VI обеспечивают точное усиление выходного сигнала по

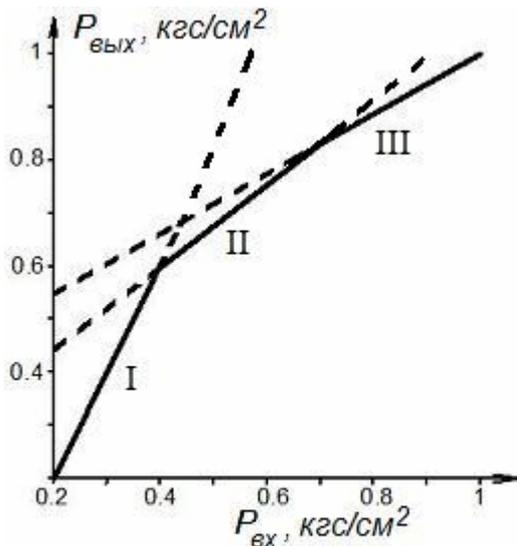


Рис.5.7. Статическая характеристика ПФ1.17-M1

мощности. Статическая характеристика прибора, приведенная на рис.5.7, иллюстрирует принцип формирования нелинейной функции методом кусочно-линейной аппроксимации. Повторители со сдвигом I, II и III формируют соответствующие участки прямых. Повторитель I реализует заданную функцию в диапазоне входных давлений $0.2 \div 0.45 \text{ кгс/см}^2$, повторитель II – в диапазоне $0.4 \div 0.7 \text{ кгс/см}^2$ и повторитель III – от 0.6 до 1 кгс/см^2 . Выходы повторителей объединены, и на вход элемента сравнения V поступает минимальное из сформированных давлений.

5.4. Устройство прямого предварения ПФ2.1-M1

Устройство прямого предварения ПФ2.1-M1 отрабатывает следующее уравнение динамики:

$$P_{\text{вых}} = T_n \frac{dP_{\text{вх}}}{d\tau} + P_{\text{вх}}, \quad (5.11)$$

где $T_n = \frac{\tilde{M}}{R\Theta\beta}$ – время предварения – настроечный параметр устройства.

Принципиальная схема устройства приведена на рис.5.8. Прибор представляет собой типовой узел предварения на элементе сравнения I с усилителем мощности на выходе. Элемент сравнения включен по альтернативной симметричной схеме с пониженным коэффициентом передачи для предотвращения потери устойчивости при больших значениях T_n . Отключающее реле II шунтирует

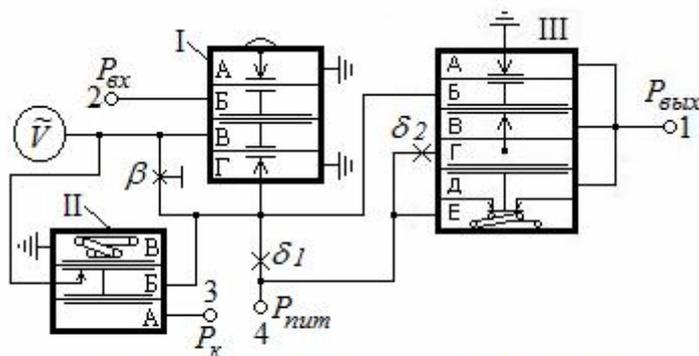


Рис.5.8. принципиальная схема ПФ2.1-M1

регулируемый дроссель β при высоком уровне сигнала P_k и, тем самым, прекращает дифференцирование входного сигнала. Передаточная функция устройства, работающего в режиме предварения, соответствует передаточной функции идеального узла предварения (3.11). Отключающее реле II шунтирует

регулируемый дроссель β при высоком уровне сигнала P_k и, тем самым, прекращает дифференцирование входного сигнала. Передаточная функция устройства, работающего в режиме предварения, соответствует передаточной функции идеального узла предварения (3.11).

5.5. Устройство обратного предварения ПФЗ.1-М1

Устройство обратного предварения ПФЗ.1-М1 обрабатывает следующее уравнение динамики:

$$T_{on} \frac{dP_{вых}}{d\tau} + P_{вых} = P_{вх}, \quad (5.12)$$

где $T_{on} = \frac{\tilde{V}M}{R\Theta\beta}$ — время обратного предварения – настроечный параметр устройства.

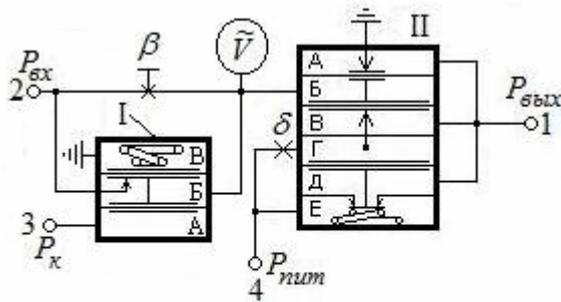


Рис.5.9. Принципиальная схема ПФЗ.1-М1

Принципиальная схема устройства приведена на рис.5.9. Прибор представляет собой типовой узел демпфирования с усилителем мощности на выходе. Отключающее реле I шунтирует регулируемый дроссель β при высоком уровне сигнала P_k и, тем самым, прекращает демпфирование входного сигнала. Передаточная функция устройства, работающего в режиме обратного предварения, соответствует передаточной функции идеального узла демпфирования (3.4).

Передаточная функция устройства, работающего в режиме обратного предварения, соответствует передаточной функции идеального узла демпфирования (3.4).

5.6. Устройство ограничения пневмосигналов ПП11.1-М1

Данное устройство предназначено для ограничения пневмосигналов по установленному максимуму или минимуму. Принципиальная схема устройства ПП11.1-М1 представлена на рис. 5.10. Устройство содержит элемент сравнения I, задатчик II, усилитель мощности III, реле переключения IV и переключатель V.

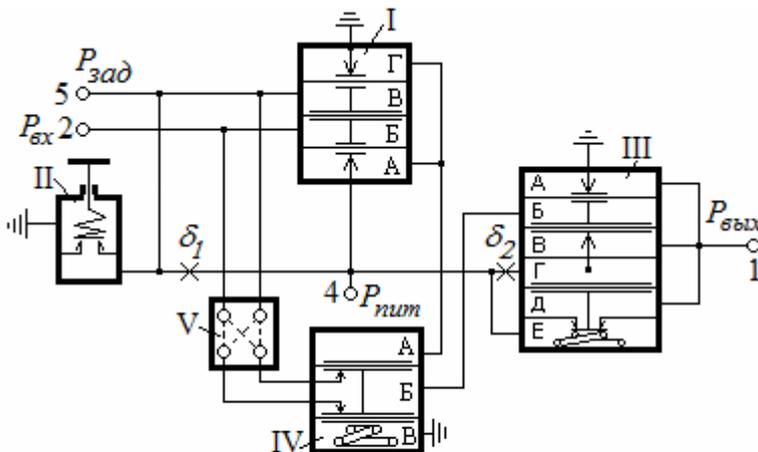


Рис.5.10. Принципиальная схема ПП11.1-М1

Элемент сравнения I работает в релейном режиме и реализует следующую выходную функцию:

$$P_I = \frac{P_{num} [1 + \text{sign}(P_{вх} - P_{зад})]}{2},$$

где P_I – выходное давление элемента сравнения I. Задатчик II устанавливает уровень ограничения сигнала.

При прямом соединении каналов переключателя V обрабатывается ограничение входного сигнала по минимуму. В этом случае на вход усилителя мощности и, следовательно, на выход устройства через реле переключения

- индикацию от 1-го до 4-х унифицированных пневмосигналов;
- регистрацию 1-го или 2-х унифицированных пневмосигналов;
- управление режимами работы систем регулирования;
- ручное дистанционное управление технологическим процессом.

Наличие первой функции обязательно для всех вторичных приборов, выполнение остальных функций зависит от конкретного назначения прибора.

Перечисленные функции реализуются тремя унифицированными узлами – узлом индикации, узлом регистрации и станцией управления.

6.1. Узел индикации вторичного измерительного прибора

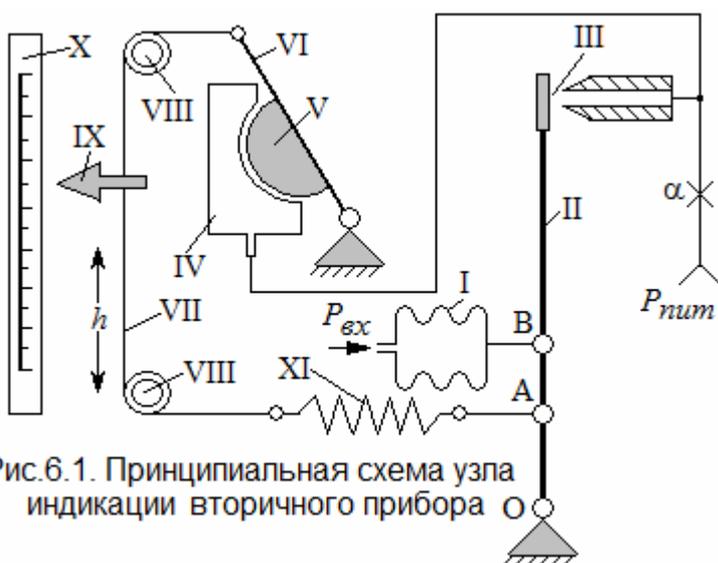


Рис.6.1. Принципиальная схема узла индикации вторичного прибора

Принципиальная схема узла индикации, представленная на рис.6.1, включает в себя следующие элементы:

I – измерительный сильфон; II – суммирующий рычаг; III – переменный дроссель типа «сопло – заслонка»; IV – чашечная мембрана; V – силовой элемент; VI – рычаг обратной связи; VII – нить; VIII – направляющие ролики; IX – указатель; X – шкала и XI – пружина обратной связи.

В основу принципа работы узла положен принцип компенсации усилий. Входное давление поступает в измерительный сильфон I и преобразуется в усилие $N_1 = P_{ex} F_{эф}$, где $F_{эф}$ – эффективная площадь сильфона. Это усилие, приложенное к точке «В» рычага II, вызывает перемещение заслонки переменного дросселя III и изменяет его проводимость. Выходное давление сумматора, образованного постоянным дросселем α и переменным дросселем III, подается в камеру чашечной мембраны IV. Здесь формируется усилие, которое через силовой элемент V передается на рычаг обратной связи VI. Рычаг VI, а вместе с ним нить VII и указатель IX получают перемещение h . Величина перемещения определяется усилием натяжения пружины XI, приложенным к точке «А» рычага II, $N_2 = K_{упр} h$, где $K_{упр}$ – жесткость пружины XI. Система будет находиться в движении до тех пор, пока моменты усилий N_1 и N_2 не уравновесят друг друга:

$$N_1 [OB] = N_2 [OA] \quad \text{или} \quad P_{ex} F_{эф} [OB] = K_{упр} h [OA].$$

Таким образом, статическая характеристика узла индикации будет иметь вид линейной функции:

$$h = \frac{F_{эф} [OB]}{K_{упр} [OA]} P_{ex}. \quad (6.1)$$

В зависимости от назначения вторичный измерительный прибор может иметь в своем составе от одного до четырех узлов индикации.

6.2. Узел регистрации вторичного измерительного прибора

Узел регистрации (рис.6.2) содержит электродвигатель I, редуктор II, держатель диаграммной ленты III и перо самописца IV, укрепленное на нити V вместе со стрелкой-указателем. Синхронный двигатель узла регистрации

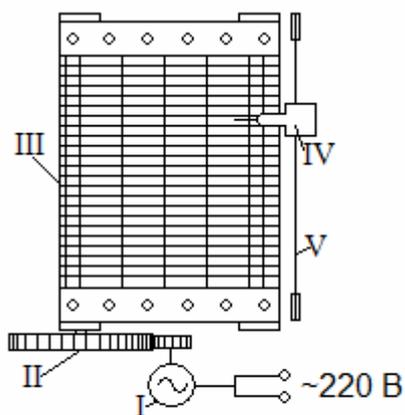


Рис.6.2. Узел регистрации вторичного прибора

питается от сети переменного тока $\sim 220\text{В}$, поэтому самопишущие вторичные приборы не относятся к категории взрывозащищенных и не могут устанавливаться в пожаро- и взрывоопасных помещениях.

В зависимости от назначения вторичного прибора он может регистрировать один унифицированный пневмосигнал (ФК0071, ПВ10.1Э), два пневмосигнала (ПВ10.2Э), три пневмосигнала (ПВ4.4Э), или функция регистрации может отсутствовать (ФК0072, ПВ3.2).

Узел регистрации имеет фиксированную скорость движения диаграммной ленты – 20мм/час.

Погрешности индикации и регистрации пневмосигналов, так же, как и погрешность скорости движения диаграммы, не должны превышать 1%.

6.3. Станция управления вторичного измерительного прибора

Станция управления предназначена для выбора режима работы системы регулирования, а также для ручного дистанционного управления технологическим процессом. Принципиальная схема станции управления приведена на

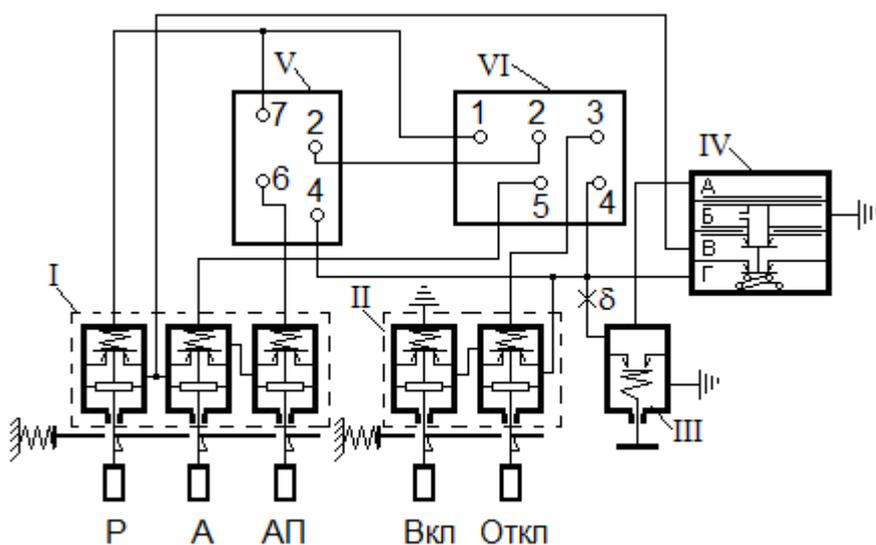


Рис.6.3. Станция управления вторичного прибора

рис.6.3. Станция содержит две группы пневмокнопок с фиксацией I и II, ручной задатчик III, усилитель мощности IV и два соединителя – для внешних подключений вторичного прибора V и для подключения регулятора VI. Группа кнопок I предназначена для выбора режима работы системы регулирования.

При нажатии кнопки «Р» реализуется режим ручного дистанционного управления (регулятор должен быть отключен). В этом режиме выходное давление ручного задатчика III, усиленное по мощности усилителем IV, подается через штуцер «7» в линию исполнительного устройства и, изменяя вручную это давление, можно управлять положением регулирующего органа.

При нажатии кнопки «А» реализуется режим автоматической стабилизации регулируемого параметра на уровне, установленном задатчиком III. В этом режиме выходное давление ручного задатчика III, усиленное по мощности усилителем IV, подается через штуцер «5» на вход задания регулятора. Выходной сигнал регулятора через штуцеры «1» и «7» подается на исполнительное устройство.

При нажатии кнопки «АП» реализуется режим автоматического программного регулирования с внешним заданием. В этом режиме пневмосигнал с выхода внешнего задатчика через штуцеры «6» и «5» подается на вход задания регулятора. Выходной сигнал регулятора через штуцеры «1» и «7» подается на исполнительное устройство.

Группа кнопок II предназначена для включения/выключения регулятора. На вход отключающего реле регулятора через штуцер «3» при нажатии кнопки «Откл» подается давление питания – $1,4 \text{ кгс/см}^2$ (регулятор отключается), а при нажатии кнопки «Вкл» \square атмосферное давление (регулятор включается). Линии сигнала переменной (текущего значения регулируемого параметра) в станции управления не задействованы.

7. Пневматические исполнительные устройства

Исполнительное устройство представляет собой конструктивное объединение исполнительного механизма и регулирующего органа.

Пневматические исполнительные механизмы преобразуют давление сжатого воздуха (выходной сигнал регулятора) в механическое перемещение регулирующего органа (клапана, заслонки, шибера и др.) Пневматические исполнительные механизмы пожаро- и взрывобезопасны, достаточно просты по устройству и могут формировать значительные перестановочные усилия при средних перемещениях (до 300 мм). По принципу работы пневматические исполнительные механизмы делятся на мембранные и поршневые.

7.1. Мембранные исполнительные механизмы

Принципиальная схема регулирующего клапана с мембранным исполнительным механизмом приведена на рис.7.1. Исполнительное устройство включает в себя:

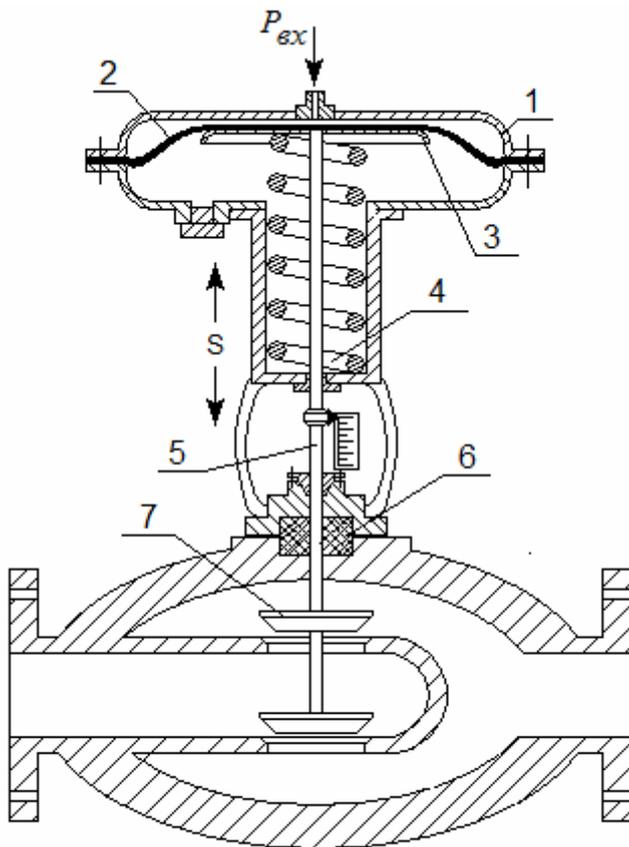


Рис.7.1. Регулирующий клапан с мембранным исполнительным механизмом

- 1 – корпус;
- 2 – мембрану;
- 3 – жесткий центр;
- 4 – многовитковую пружину;
- 5 – шток;
- 6 – сальниковое уплотнение;
- 7 – регулирующий орган.

Входное давление P_{ex} развивает на мембране 2 перестановочное усилие, которое передается штоком 5 регулирующему органу 7 и вызывает его перемещение относительно начального положения. Противодействующее усилие формируется пружиной 4.

Зависимость положения жесткого центра мембраны S от входного давления P_{ex} называют ходовой характеристикой исполнительного устройства. Для вывода ходовой характеристики примем следующие допущения:

начальным положением мембраны 2, штока 5 и регулирующего органа 7 является крайнее верхнее положение. Усилия и перемещения, направленные сверху вниз, будем считать положительными, а снизу вверх – отрицательными. К жесткому центру 3 мембраны 2 приложены следующие усилия: N_1 – положительное усилие, формируемое входным давлением $N_1 = P_{ex} F_{эф}$, где $F_{эф}$ – эффективная площадь мембраны 2; N_2 – отрицательное усилие начального сжатия пружины 4; N_3 – знакопеременное усилие трения в сальниковом уплотнении 6; N_4 – знакопеременное усилие реакции регулируемой среды. Суммарное усилие, приложенное к мембране (следовательно, к штоку и регулируемому органу):

$$N_{\Sigma} = N_1 - N_2 \pm N_3 \pm N_4 = P_{ex} F_{эф} - N_2 \pm N_3 \pm N_4. \quad (7.1)$$

Под действием этого усилия мембрана, а вместе с ней шток и регулирующий орган получают перемещение:

$$S = \frac{P_{ex} F_{эф} - N_2 \pm N_3 \pm N_4}{K_{упр}}, \quad (7.2)$$

где $K_{упр}$ – жесткость пружины 4. Графическая интерпретация ходовой характеристики исполнительного устройства (7.2) представлена на рис.7.2. Наличие знакопеременных составляющих N_3 и N_4 в уравнении (7.2) обуславливает нелинейность и гистерезис ходовой характеристики мембранного испол-

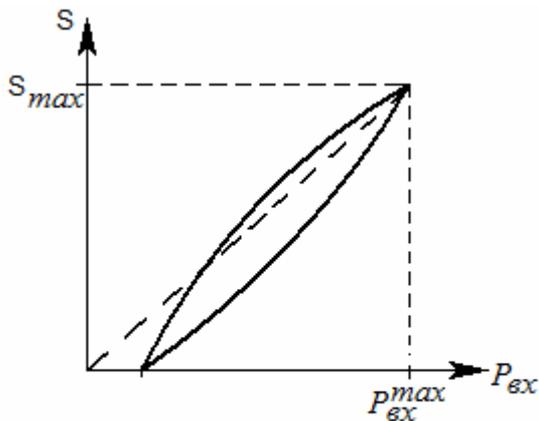


Рис.7.2. Ходовая характеристика мембранного исполнительного механизма

нительного механизма. Усилие начального сжатия пружины N_2 сдвигает ходовую характеристику по оси абсцисс на некоторую величину. Нелинейность и гистерезис ходовой характеристики исполнительного устройства могут отрицательно сказаться на качестве регулирования. Для уменьшения этого эффекта исполнительные механизмы комплектуются специализированными усилителями давления – позиционерами.

7.2. Позиционеры

Позиционер (рис.7.3) представляет собой усилитель давления с механической обратной связью. По принципу действия позиционер аналогичен элементу сравнения. Основными составляющими позиционера являются: корпус 1; шток 2; пружина 3; мембранный блок 4 и сдвоенный переменный дроссель 5.

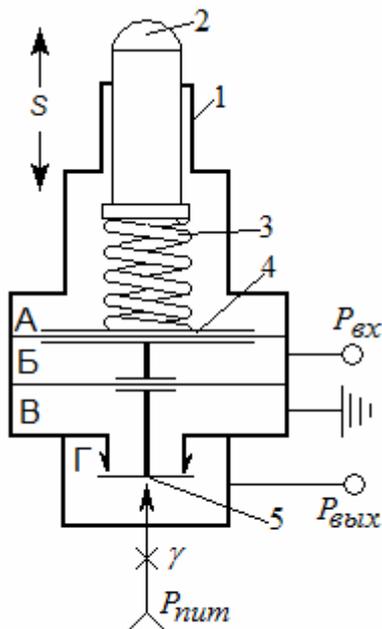


Рис.7.3. Позиционер

Питание позиционера осуществляется сжатым воздухом давлением от 4 до 25 кгс/см². Для вывода статической характеристики позиционера примем следующие допущения: исходным положением штока 2 и мембранного блока 4 является крайнее нижнее; усилия и перемещения, направленные снизу вверх, будем считать положительными, а сверху вниз – отрицательными. Зависимость выходного давления позиционера от положения мембранного блока и подвижной части переменного дросселя 5 будем считать линейной: $P_{вых} = K_a h$, где K_a – коэффициент пропорциональности и h – перемещение мембранного блока 4.

На мембранный блок позиционера действуют следующие усилия:

$N_5 = P_{ex} (F_n \square f_n)$, где F_n и f_n – эффективные площади мембран с большим и малым жестким центром в блоке 4; $N_6 = -K_{yup1} S$ – отрицательное усилие сжатия пружины 3, где K_{yup1} – жесткость пружины 3. Под действием результирующего усилия $N_5 \square N_6$ мембранный блок 4, а вместе с ним подвижная часть переменного дросселя 5 получают перемещение:

$$h = \frac{N_5 - N_6}{K_{yup2}} = \frac{P_{ex} (F_n - f_n) - K_{yup1} S}{K_{yup2}}, \quad (7.3)$$

где K_{yup2} – жесткость мембранного блока 4. На выходе позиционера при этом устанавливается давление:

$$P_{вых} = K_{\alpha} \frac{P_{ex} (F_n - f_n) - K_{унп1} S}{K_{унп2}} \quad (7.4)$$

Из соотношения (7.4) можно сделать вывод, что выходное давление позиционера является линейной функцией как входного давления, так и положения штока 2.

При подключении позиционера к исполнительному механизму (рис.7.4) шток позиционера 2 приводится в контакт с жестким центром мембраны исполнительного механизма 1, а выходное давление позиционера подается на вход исполнительного механизма. Для получения статической характеристики исполнительного механизма с позиционером подставим выходное давление позиционера (7.4) в качестве входного давления в (7.2):

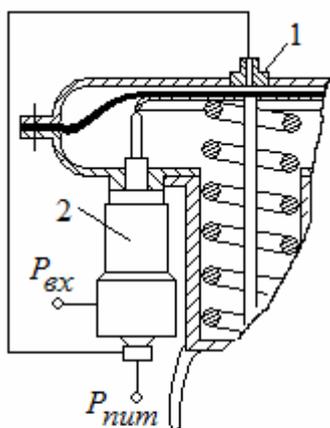


Рис.7.4. Подключение позиционера к исполнительному механизму

$$S = K_{\alpha} F_{\text{эф}} \frac{P_{ex} (F_n - f_n) - K_{унп1} S}{K_{унп} K_{унп2}} + \frac{-N_2 \pm N_3 \pm N_4}{K_{унп}} \quad (7.5)$$

$$\text{или } S = \frac{\frac{K_{\alpha} F_{\text{эф}} (F_n - f_n)}{K_{унп} K_{унп2}} P_{ex} + \frac{-N_2 \pm N_3 \pm N_4}{K_{унп}}}{1 + \frac{K_{унп1} K_{\alpha} F_{\text{эф}}}{K_{унп} K_{унп2}}} \quad (7.6)$$

Конструктивные особенности исполнительных механизмов и позиционеров таковы, что

$\frac{K_{унп1} K_{\alpha} F_{\text{эф}}}{K_{унп} K_{унп2}} \gg 1$. Поэтому единицей в знаменателе

(7.6) можно пренебречь, и ходовая характеристика исполнительного механизма примет вид:

$$S = \frac{(F_n - f_n)}{K_{унп1}} P_{ex} + (-N_2 \pm N_3 \pm N_4) \frac{K_{унп2}}{K_{унп1} K_{\alpha} F_{\text{эф}}} \quad (7.7)$$

Сравнивая выражения (7.2) и (7.7) можно прийти к выводу, что с применением позиционера действие нежелательных факторов N_2 , N_3 и N_4 ослабляется в $\frac{K_{унп1} K_{\alpha} F_{\text{эф}}}{K_{унп2}}$ раз. Это практически ликвидирует нелинейность и гистерезис ходовой характеристики мембранного исполнительного механизма.

7.3. Поршневые исполнительные механизмы

Поршневые исполнительные механизмы применяют в тех случаях, когда процесс регулирования требует больших перемещений регулирующего органа (до 300 мм). Упрощенная схема поршневого пневмопривода ПСП-1 приведена на рис.7.5.

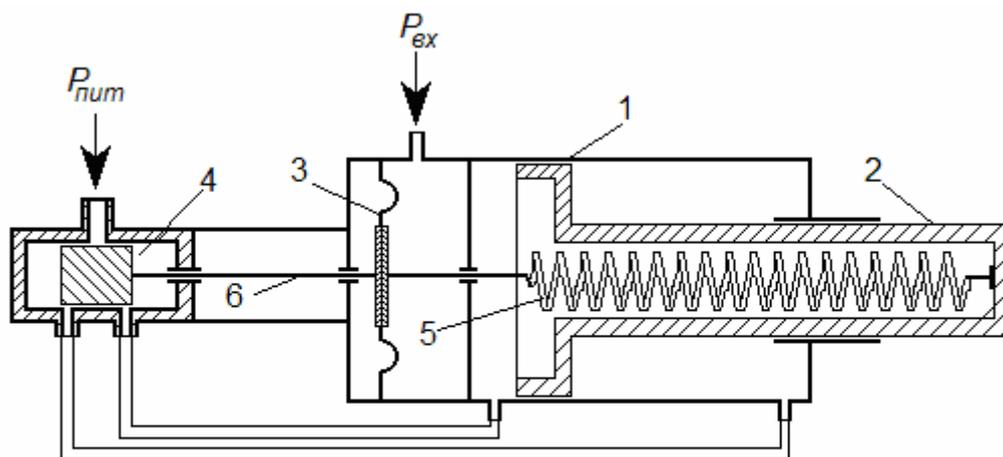


Рис.7.5. Принципиальная схема поршневого исполнительного механизма

Пневмопривод включает в себя: цилиндр 1; поршень 2; мембрану с жестким центром 3; золотник 4; пружину обратной связи 5 и шток 6, связывающий жесткий центр мембраны 3 с клапаном золотника и пружиной обратной связи. Конструктивно пневмопривод объединяет исполнительный механизм (цилиндр 1 и поршень 2) с мембранно-золотниковым позиционером (остальные элементы).

Выходной сигнал регулятора подается в качестве входного давления $P_{\text{вх}}$ в мембранную камеру и формирует усилие $N_1 = P_{\text{вх}} F_{\text{эф}}$, где $F_{\text{эф}}$ – эффективная площадь мембраны 3. Со стороны пружины обратной связи 5 к жесткому центру мембраны приложено усилие $N_2 = K_{\text{упр}} S$, где $K_{\text{упр}}$ – жесткость пружины и S – перемещение поршня 2 относительно начального положения. Под действием результирующего усилия жесткий центр мембраны получает перемещение, которое передается штоком 6 золотнику 4. Последний направляет давление питания ($5 \div 10$ кгс/см²) в левую или правую часть цилиндра 1, что приводит к перемещению поршня 2. Поршень будет находиться в движении до тех пор, пока усилия N_1 и N_2 не уравновесят друг друга. Поскольку перестановочное усилие исполнительного механизма довольно велико (для типовых приводов до 500 кгс), усилиями трения в уплотнениях и реакцией регулируемой среды можно пренебречь. Тогда ходовая характеристика поршневого пневмопривода, полученная из равенства $N_1 = N_2$, будет иметь вид линейной функции:

$$S = \frac{F_{\text{эф}}}{K_{\text{упр}}} P_{\text{вх}}. \quad (7.8)$$

7.4. Основные параметры и характеристики пневматических исполнительных устройств

При выборе исполнительного устройства решающую роль играют параметры и характеристики регулирующего органа, который преобразует перемещение исполнительного механизма в регулирующую переменную объекта

управления. Регулирующий орган исполнительного устройства характеризуется совокупностью количественных и качественных параметров, одни из которых определяют применимость данного типа изделий в конкретной системе автоматизации, а другие характеризуют статические свойства регулирующего органа, как элемента контура регулирования.

K_v – пропускная способность регулирующего органа. Под пропускной способностью понимают объемный расход через регулирующий орган жидкости плотностью $\rho=1 \text{ г/см}^3$ при перепаде давления на регулирующем органе $\Delta P=1 \text{ кгс/см}^2$. Пропускная способность измеряется в $\text{м}^3/\text{час}$ и связана с объемным расходом Q соотношением:

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}}. \quad (7.9)$$

Пропускная способность полностью открытого регулирующего органа называется условной пропускной способностью K_{vy} . Отношение $\sigma=K_v/K_{vy}$ – относительная пропускная способность.

Перемещение подвижной части регулирующего органа относительно начального положения называют ходом S исполнительного устройства. Максимальное значение хода считают условным ходом S_y . Отношение $l=S/S_y$ называют относительным ходом.

Объемный расход регулируемой среды через полностью открытый регулирующий орган называют условным расходом Q_y . Отношение $q=Q/Q_y$ – относительный расход. Величина относительного расхода определяется пропускной способностью исполнительного устройства, свойствами регулируемой среды и гидравлическими параметрами участка трубопровода, на котором исполнительное устройство установлено.

Основным конструктивным параметром исполнительного устройства является диаметр условного прохода D_y , который соответствует внутреннему диаметру фланцев, присоединяющих исполнительное устройство к трубопроводу.

Условным давлением P_y называют максимально допустимое статическое давление регулируемой среды в регулирующем органе.

Для каждого исполнительного устройства устанавливается диапазон рабочих температур $T_{min} \div T_{max}$.

Видом действия исполнительного устройства называют его состояние в отсутствие управляющего сигнала. По виду действия различают нормально открытые (НО) и нормально закрытые (НЗ) исполнительные устройства. Выбор того или иного вида действия зависит от конкретных особенностей объекта управления и, в частности, от правил безопасного ведения технологического процесса.

Качественными параметрами исполнительных устройств являются их пожаро- и взрывобезопасность и коррозионная стойкость. Пневматические исполнительные устройства по принципу работы являются пожаро- и взрывобезопасными.

Функционирование каждого исполнительного устройства может быть описано тремя характеристиками – ходовой, пропускной и расходной.

Ходовой характеристикой называют зависимость абсолютного S или относительного l хода от величины управляющего сигнала. Для пневматических исполнительных устройств наиболее часто используется ходовая характеристика в виде:

$$l=f(P_{\text{вых}}), \quad (7.10)$$

где $P_{\text{вых}}$ – выходное давление регулятора. Для подавляющего большинства пневматических исполнительных устройств уравнение (7.10) имеет вид линейной функции.

Пропускной характеристикой называют зависимость относительной пропускной способности σ от относительного хода l . Большинство пневматических исполнительных устройств выпускаются с двумя типами пропускных характеристик – линейной и равнопроцентной. Линейная пропускная характеристика имеет вид:

$$\sigma=\sigma_0+l(l-\sigma_0) \quad (7.11) \quad \text{и равнопроцентная: } \sigma=\sigma_0^{1-l}. \quad (7.12)$$

Начальная относительная пропускная способность (пропускная способность полностью закрытого регулирующего органа) нормируется на уровне 2%. Ненулевое значение начальной пропускной способности обусловлено необходимостью защиты исполнительных устройств и трубопроводов от гидравлических ударов, которые могут возникать при полном перекрытии потока регулируемой среды.

Расходная характеристика – зависимость относительного расхода q от относительного хода l может быть линейной или равнопроцентной в зависимости от характера компенсируемых возмущений и требований к качеству регулирования технологических переменных.

8. Пневматические линии связи

Линии связи, используемые для передачи пневмосигналов между датчиками, регуляторами и исполнительными устройствами, представляют собой металлические или пластмассовые трубки внутренним диаметром $4\div 8$ мм. При больших длинах динамика линий связи может оказывать влияние на качество регулирования, поэтому свойства линий связи должны учитываться при синтезе систем регулирования.

Пневмосигналы распространяются по линиям связи с конечной скоростью – со скоростью звука. Поэтому длинная пневматическая линия будет обладать чистым запаздыванием, время которого можно оценить, как:

$$\tau_3 = \frac{L}{c}, \quad (8.1)$$

где L – длина линии и c – скорость звука в воздухе.

С точки зрения гидродинамики длинная пневмолиния обладает распределенной емкостью и распределенным сопротивлением. Сочетание этих факторов обуславливает определенную инерционность пневматических линий связи. Мерой инерционности служит постоянная времени, зависящая от размеров линии, свойств материала, из которого линия изготовлена, от давления

и влажности сжатого воздуха и некоторых других факторов. Порядок постоянной времени длинной пневматической линии можно оценить с помощью эмпирического уравнения:

$$T = \frac{8\mu L^2}{P_0 k r^2}, \quad (8.2)$$

где r – внутренний диаметр длинной линии, k – показатель адиабаты, μ и P_0 , соответственно, динамическая вязкость и начальное давление воздуха в линии.

В некоторых случаях для оценки динамических свойств линий связи используют графики и номограммы, приведенные в справочной литературе (рис.8.1).

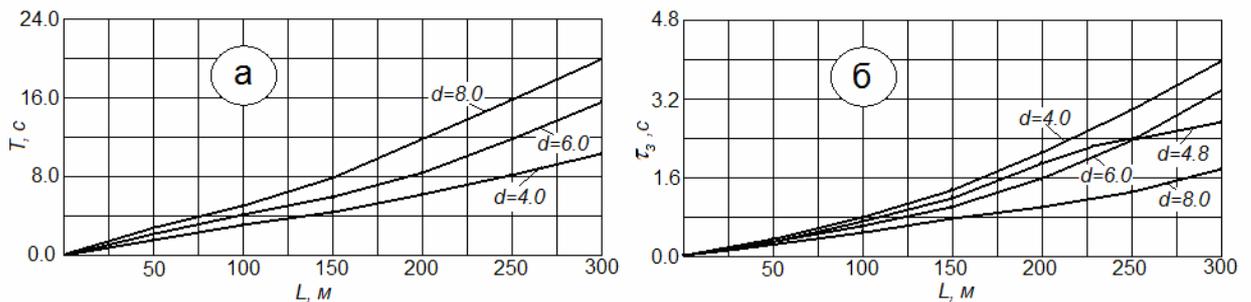


Рис.8.1. Зависимости постоянной времени (а) и времени запаздывания (б) длинной пневматической линии от длины и диаметра

Экспериментальные характеристики пневматических линий связи, как правило, несколько отличаются от расчетных, поскольку уравнения (8.1) и (8.2) не учитывают шероховатость и влажность стенок канала пневмопровода, наличие местных сужений, изменение формы сечения канала линии по длине и др.

9. Одноконтурная стабилизирующая система автоматического регулирования

Одноконтурная стабилизирующая система регулирования обеспечивает поддержание регулируемого параметра на заданном постоянном значении и

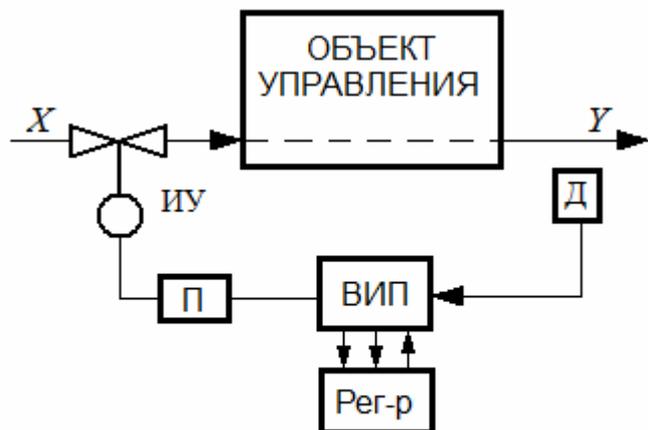


Рис.9.1. Структура одноконтурной стабилизирующей САР

может использоваться для ручного дистанционного управления технологическим процессом. Структура одноконтурной стабилизирующей САР (рис.9.1) включает в себя датчик регулируемого параметра $Д$, вторичный измерительный прибор $ВИП$, регулятор $Рег-р$, позиционер $П$ и исполнительное устройство $ИУ$.

В рамках данной структуры взаимодействие вторичного измерительного прибора и регулятора может быть организовано

двумя способами. Если инерционность и запаздывание в линиях связи не оказывают существенного влияния на качество регулирования (например, в случае высокой инерционности объекта управления), то регулятор монтируется непосредственно на вторичном измерительном приборе и устанавливается в щитовом помещении вдали от технологического объекта. Регулятор соединяется с датчиком и исполнительным устройством двумя линиями связи. Такая схема (рис.9.2) получила название двухтрубной.

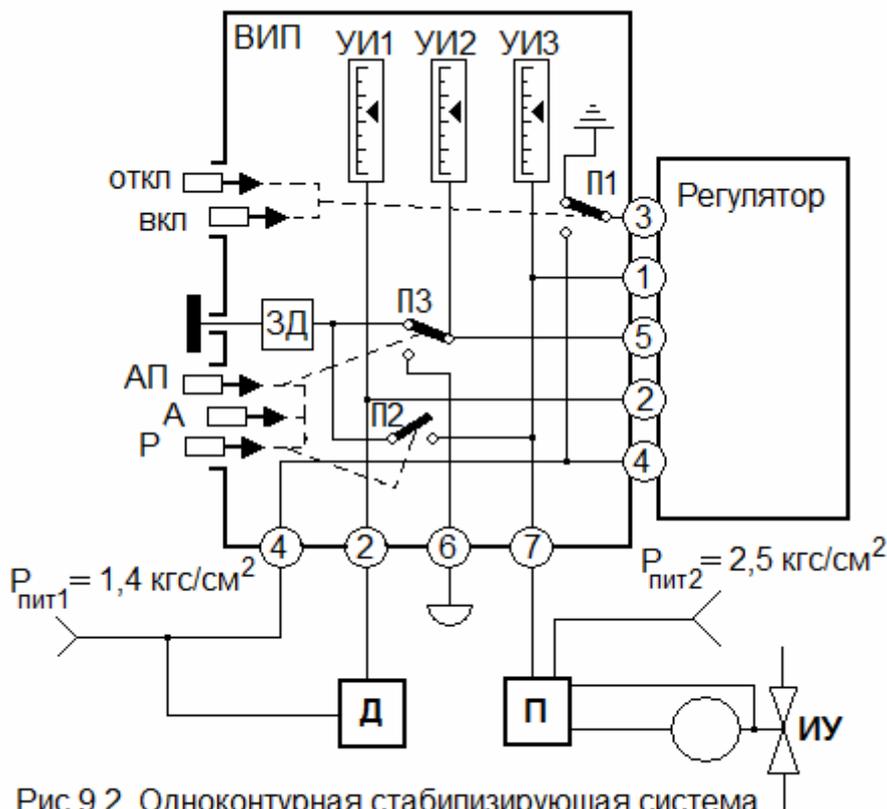


Рис.9.2. Одноконтурная стабилизирующая система регулирования. Двухтрубная схема

Положение переключателей станции управления вторичного прибора на рис.9.2 соответствует режиму автоматической стабилизации регулируемого параметра. В этом режиме переключатель «П1» соединяет управляющий вход отключающего реле регулятора через штуцер «3» с атмосферой. Регулятор включен и его выход соединен через штуцеры «1» и «7» со входом позиционера исполнительного устройства. Переключатель «П2» разомкнут и выход ручного задатчика станции управления отключен от линии исполнительного устройства. Переключатель «П3» соединяет выход ручного задатчика станции управления через штуцер «5» со входом задания регулятора. Узлы индикации вторичного измерительного прибора УИ1, УИ2 и УИ3 показывают, соответственно, текущее значение регулируемого параметра, заданное значение регулируемого параметра и давление в линии исполнительного устройства.

При переключениях режимов работы системы регулирования необходимо предотвращать резкие изменения давления в линии исполнительного устройства, которые могут повлечь за собой непредсказуемые изменения режима работы технологического объекта. Безударный переход в режим ручного дистанционного управления осуществляется следующим образом. На кнопочном переключателе станции управления нажимают кнопку «Откл». Переключатель «П1» соединяет управляющий вход отключающего реле регулятора через штуцер «3» с линией питания и регулятор отключается. Затем выравнивают выходное давление ручного задатчика с текущим давлением в ли-

нии исполнительного устройства (по показаниям узлов индикации УИ2 и УИ3). И, наконец, нажатием кнопки «Р» замыкают переключатель «П2», который соединяет выход ручного задатчика через штуцер «7» со входом позиционера. В данном состоянии можно с помощью ручного задатчика дистанционно изменять положение исполнительного устройства.

Для безударного перехода из режима ручного управления в режим автоматической стабилизации необходимо при отключенном регуляторе нажать кнопку «А». Это приведет к размыканию переключателя «П2» и к отключению выхода ручного задатчика от линии исполнительного устройства. Затем необходимо выровнять сигнал задания с сигналом текущего значения регулируемого параметра (по показаниям узлов индикации УИ1 и УИ2) и нажатием кнопки «Вкл» включить регулятор.

Следует отметить, что принцип работы станции управления вторичного измерительного прибора не защищает систему регулирования от неправильных действий оператора, например, при одновременном нажатии кнопок «Вкл» и «Р» вход позиционера оказывается подключенным к двум источникам давления – к выходу регулятора и к выходу ручного задатчика.

Если инерционность и запаздывание в линиях связи могут отрицательно повлиять на качество регулирования, то используется пятитрубная схема включения регулятора (рис 9.3). Регулятор при этом монтируется на местном щите в непосредственной близости от датчика и исполнительного устройства и соединяется со вторичным измерительным прибором пятью линиями связи.

С целью уменьшения инерционности системы по каналу регулирования короткие линии связи регулятора с датчиком и исполнительным устройством отделены от длинных линий, связывающих регулятор со вторичным измерительным прибором усилителями мощности ПП1.5М1.

Реле переключения ПП2.5М1 используется для изменения направления распространения пневмосигнала в линии, соединяющей штуцеры «1» регуля-

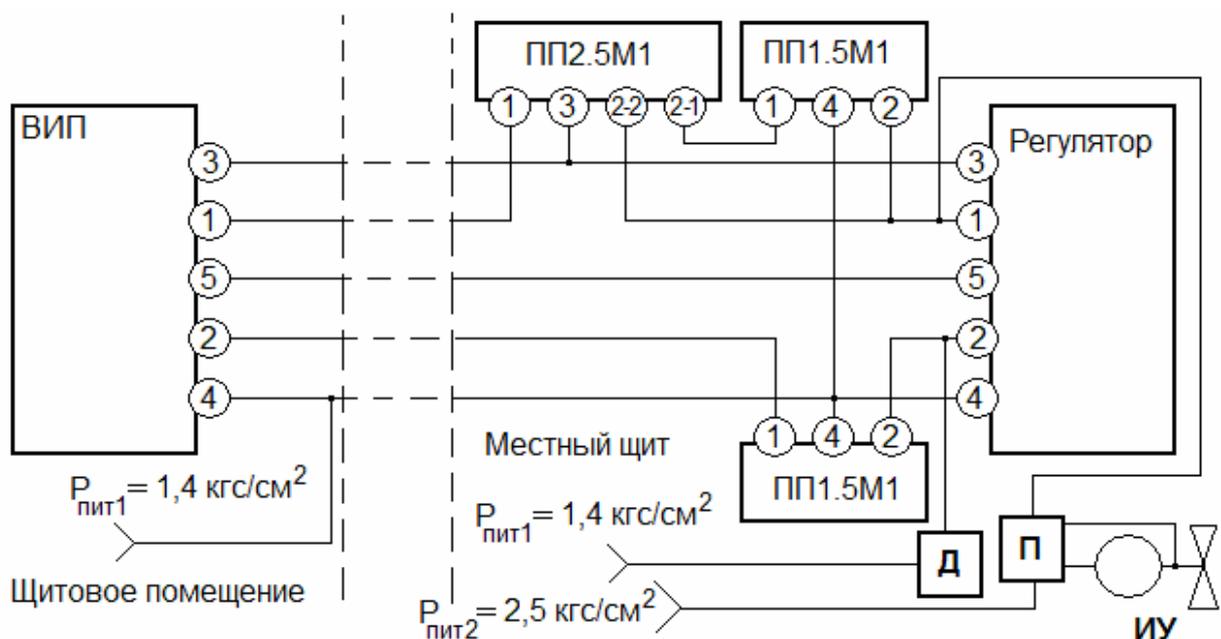


Рис.9.3.Пятитрубная схема включения регулятора

тора и вторичного измерительного прибора при переключениях режимов работы системы регулирования. В режиме автоматической стабилизации регулируемого параметра давление на управляющем входе реле переключения (штуцер «3») равно нулю, что отвечает замыканию штуцеров «1» и «2-1» реле ПП2.5М1.

При этом выходное давление регулятора передается через усилитель мощности ПП1.5М1 и канал реле переключения на штуцер «1» и далее, на узел индикации вторичного измерительного прибора. В режиме ручного дистанционного управления давление на управляющем входе реле переключения (штуцер «3») равно давлению питания, что отвечает замыканию штуцеров «1» и «2-2» реле ПП2.5М1. В данном состоянии выходное давление ручного задатчика вторичного прибора поступает через штуцер «1» и канал реле переключения на вход позиционера. В остальном, работа пятитрубной схемы аналогична работе двухтрубной.

10. Типовые системы регулирования на базе пневматических регуляторов

Принципы построения и функционирования систем регулирования на базе пневматических средств автоматизации во многом зависят от функционального назначения систем регулирования. Средствами агрегатного комплекса «СТАРТ» могут быть построены как одноконтурные, так и многоконтурные системы регулирования, в которых контуры реализованы по двухтрубной или пятитрубной схеме.

Типовые одноконтурные системы можно классифицировать на многоимпульсные, комбинированные и системы регулирования по вычисляемым параметрам. К многоконтурным системам относятся каскадно-связанные, следящие, а также системы приоритетного и многосвязного регулирования.

На схемах функциональных структур систем регулирования (рис. 10.1 – 10.9) приняты следующие обозначения:

- X – регулирующая переменная; Y – регулируемая переменная;
- μ – регулирующее воздействие; λ – возмущение;
- ТОУ – технологический объект управления;
- РУ – регулируемый участок; Д – датчик;
- ВИП – вторичный измерительный прибор; Р – регулятор;
- РС – регулятор соотношения; КР – корректирующий регулятор;
- ВР – вспомогательный регулятор;
- Σ – алгебраический сумматор; $\times K$ – блок масштабирования;
- ВУ – вычислительное устройство; БО – блок ограничения;
- БС – блок селектирования; $\frac{d}{dt}$ \square блок предварения;
- П – позиционер; ИМ – исполнительный механизм;
- РО – регулирующий орган.

10.1. Многоимпульсные системы регулирования

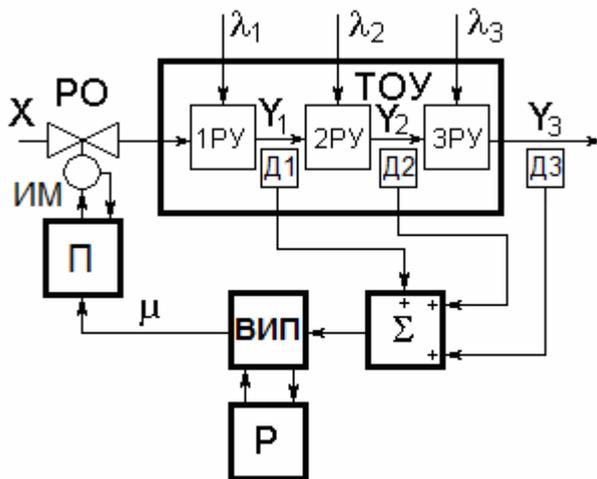


Рис.10.1. Функциональная структура многоимпульсной системы регулирования

Функциональная структура многоимпульсной системы, приведенная на рис. 10.1, предусматривает получение информации о состоянии объекта управления при помощи некоторого множества датчиков, распределенного по пространственным координатам объекта. Измеренные значения регулируемого параметра в виде унифицированных сигналов поступают в сумматор, формирующий итоговое значение регулируемой переменной.

Выходной сигнал сумматора в качестве текущего значения регулируемого параметра поступает в одноконтурную систему регулирования, построенную по двухтрубному или пятитрубному варианту.

В качестве сумматоров, как правило, используются блоки суммирования ПФ1.1-М1. Данный прибор имеет два положительных входа, следовательно, для суммирования сигналов от N датчиков необходимо использовать $N-1$ сумматор. При превышении суммарным сигналом предельного значения 1 кгс/см^2 в сумматорах вводятся константы C_1 (ур-е 5.1), снижающие уровень сигнала до приемлемых значений. Если выходные сигналы датчиков используются с равными весами, то значения констант C_1 во всех сумматорах должны быть одинаковы.

Данная система, как и система стабилизирующего регулирования, может функционировать в двух режимах – в режиме ручного дистанционного управления и в режиме автоматической стабилизации. Методика переключения режимов работы полностью аналогична описанной в п.9.

10.2. Системы комбинированного регулирования

Комбинированными считаются системы регулирования, в которых регулирующее воздействие формируется на основе отклонения регулируемого параметра от задания и измеряемых возмущений. При этом возмущающие воздействия могут быть учтены в виде абсолютных значений или в виде производных по времени. Первый вариант функциональной структуры представлен на рис.10.2. В данной системе датчик Д1 измеряет текущее значение регулируемого параметра, а датчик Д2 – возмущающее воздействие. Выходной сигнал датчика Д2 масштабируется блоком умножения на постоянный коэффициент и суммируется с выходным сигналом датчика Д1. В качестве блока умножения на постоянный коэффициент используется прибор ПФ1.3.9-М1, а в качестве сумматора – прибор ПФ1.1-М1.

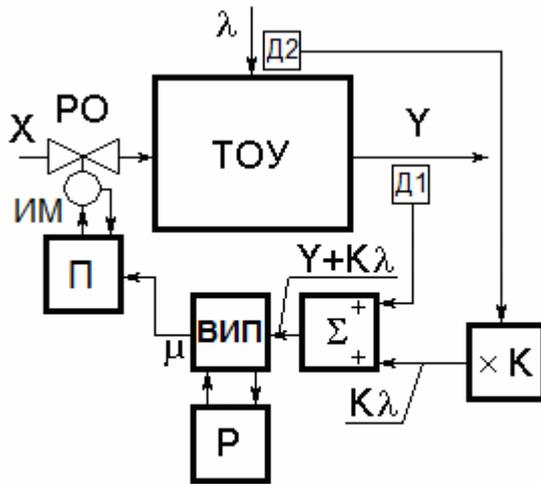


Рис.10.2. Функциональная структура системы комбинированного регулирования с использованием абсолютного значения возмущения

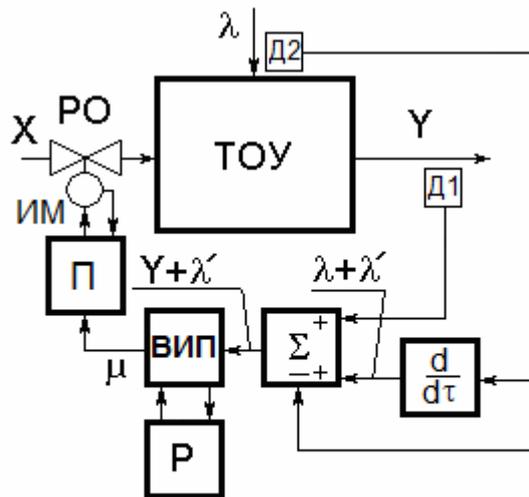


Рис.10.3. Функциональная структура системы комбинированного регулирования с использованием производной от возмущения

Функциональная структура системы комбинированного регулирования с использованием производной от возмущения приведена на рис.10.3. Вычисление первой производной по времени от возмущения выполняется прибором прямого предварения ПФ2.1-М1. Выходной сигнал блока предварения пропорционален ве-

$$\text{личине } T_n \frac{dP_\lambda}{dt} + P_\lambda,$$

где P_λ – выходной сигнал датчика Д2 и T_n – установленное время предварения.

Для выделения производной $T_n \frac{dP_\lambda}{dt}$ из

выходного сигнала блока ПФ2.1-М1 вычитается выходной сигнал датчика Д2. Результат этой операции суммируется с выходным сигналом

датчика Д1. Алгебраическое суммирование сигналов выполняется с помощью сумматора ПФ1.1-М1.

Регулятор в системах комбинированного регулирования может быть включен как по двухтрубной, так и по пятитрубной схеме. Рассматриваемые системы могут функционировать в двух режимах – в режиме ручного дистанционного управления и в режиме автоматической стабилизации. Методика переключения режимов работы полностью совпадает с описанной в п.9.

10.3. Системы регулирования по вычисляемым параметрам

В системах регулирования по вычисляемым параметрам (рис.10.4) выходные сигналы датчиков обрабатываются вычислительным устройством, реализующим необходимую функцию (линейную или нелинейную) одной или нескольких технологических переменных. Такого рода системы используются при необходимости линеаризации статических характеристик датчи-

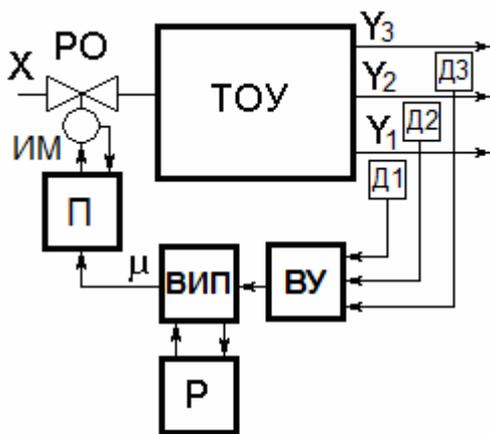


Рис.10.4. Функциональная структура системы регулирования по вычисляемым параметрам

ков или самого объекта управления, а также при построении систем регулирования по результатам косвенных измерений. С точки зрения функциональной организации многоимпульсные и комбинированные системы регулирования можно рассматривать, как частные случаи системы регулирования по вычисляемым параметрам.

Вычислительные устройства в таких системах строятся на основе типовых блоков линейных и нелинейных статических преобразований

– сумматоров ПФ1.1-М1, блоков умножения на постоянный коэффициент ПФ1.3.9-М1, приборов извлечения корня ПФ1.17-М1 и множително-делительных устройств ПФ1.18. Регулятор в системе регулирования по вычисляемым параметрам может быть включен как по двухтрубной, так и по пятитрубной схеме. Данная система может функционировать в двух режимах – в режиме ручного дистанционного управления и в режиме автоматической стабилизации. Методика переключения режимов работы полностью совпадает с описанной в п.9

10.4. Системы следящего регулирования

Различают следящие системы, в которых коэффициент соотношения является настроечным параметром и системы регулирования с коррекцией коэффициента соотношения по третьему параметру. Функциональная структура следящей системы первого типа представлена на рис.10.5.

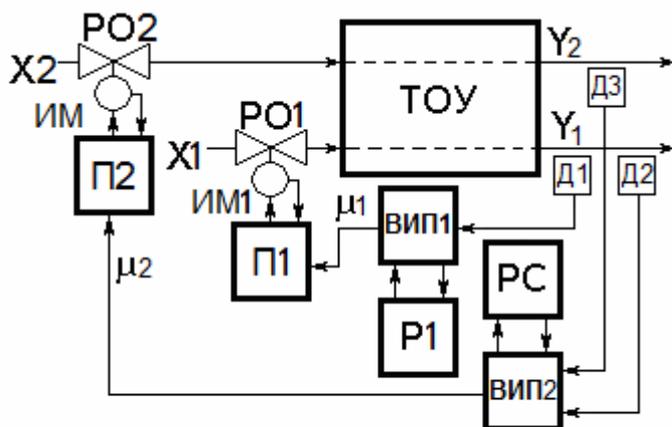


Рис.10.5. Функциональная структура системы следящего регулирования

Регулирование ведущего параметра Y_1 осуществляется стабилизирующей системой, включающей датчик Д1, вторичный измерительный прибор ВИП1, регулятор Р1, позиционер П1 и исполнительное устройство ИМ1, РО1. Контур регулирования ведомого параметра включает в себя датчики Д2 и Д3, вторичный измерительный прибор ВИП2, регулятор соотношения РС (ПР3.33-М1), позиционер П2 и исполнительное устройство ИМ2, РО2.

Контур регулирования ведущего параметра работает как обычная одноконтурная стабилизирующая система (см. п.9). Контур регулирования ведомого параметра может функ-

ционировать в трех режимах – в режиме ручного дистанционного управления, в режиме автоматической стабилизации с внутренним заданием и в режиме следящего регулирования.

Переход в режим следящего регулирования из режима автоматической стабилизации выполняется следующим образом:

- а) отключают регулятор соотношения;
- б) нажатием кнопки «АП» станцию управления ВИП2 переводят в режим программного регулирования;
- в) устанавливают коэффициент соотношения РС, соответствующий равенству выходного давления регулятора (по показаниям дополнительного манометра) и давления в линии исполнительного устройства (по показаниям 4-го узла индикации ВИП2);
- г) включают регулятор соотношения.

Обратный переход (к режиму автоматической стабилизации) выполняется в последовательности:

- а) отключают регулятор соотношения;
- б) нажатием кнопки «А» станцию управления ВИП2 переводят в режим автоматической стабилизации;
- в) с помощью ручного задатчика станции управления ВИП2 выравнивают давление задания с текущим значением ведущего параметра (по показаниям 1-го и 3-го узлов индикации ВИП2);
- г) включают регулятор соотношения.

Функциональная структура следящей системы с коррекцией коэффициента соотношения по третьему параметру приведена на рис.10.6. Контур регулирования соотношения в данной структуре строится на базе регулятора соотношения ПРЗ.34-М1.

Коррекция коэффициента соотношения осуществляется отдельным контуром регулирования, включающим датчик Д4, вторичный измерительный прибор ВИП3 и корректирующий регулятор КР (ФР0091, ФР0095 или ФР0098).

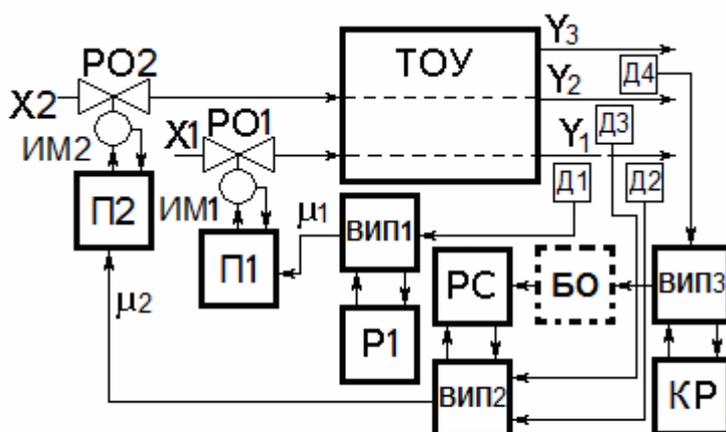


Рис.10.6. Функциональная структура системы следящего регулирования с коррекцией по третьему параметру

В некоторых случаях по условиям ведения технологического процесса требуется ограничить влияние корректирующего параметра на коэффициент соотношения. Тогда на корректирующем входе регулятора соотношения

устанавливают блок ограничения ПП1 1.1-М1 (или два блока при необходимости двухстороннего ограничения сигнала). Контур регулирования ведущего параметра и коррекции коэффициента соотношения работают как обычные одноконтурные стабилизирующие системы (см. п.9). Режимы рабо-

ты контура регулирования соотношения и методика перехода от одного режима к другому аналогичны описанным выше.

10.5. Системы каскадно-связанного регулирования

Функциональная структура системы каскадно-связанного регулирования приведена на рис.10.7. Главный контур системы, включающий в себя коррек

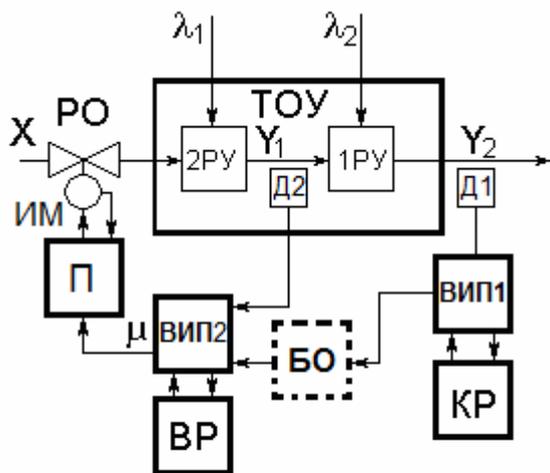


Рис.10.7. Функциональная структура каскадно-связанной системы регулирования

тирующий регулятор КР, формирует сигнал задания для вспомогательного контура, непосредственно воздействующего на технологический объект. Главный контур может функционировать в двух режимах – в режиме ручного дистанционного управления и в режиме автоматической стабилизации задания для вспомогательного регулятора ВР. Вспомогательный контур может функционировать в трех режимах – в режиме ручного дистанционного управления, в режиме автоматической стабилизации регулируемого параметра и в режиме каскадного ре

гулирования. Режимы ручного дистанционного управления и автоматической стабилизации регулируемого параметра вспомогательного контура отработываются по аналогии с одноконтурной стабилизирующей системой (см. п. 9). При работе вспомогательного контура в этих режимах главный контур бездействует. Перевод системы в режим каскадного регулирования осуществляется из режима автоматической стабилизации следующим образом:

- а) главный контур переводится в режим ручного дистанционного управления;
- б) отключают вспомогательный регулятор;
- в) нажатием кнопки «АП» станцию управления ВИП2 переводят в режим программного регулирования;
- г) с помощью ручного задатчика ВИП1 выравнивают выходной сигнал главного контура с текущим значением переменной Y_1 (по показаниям 1-го и 2-го узлов индикации ВИП2);
- д) включают вспомогательный регулятор;
- е) главный контур переводится в режим автоматической стабилизации задания.

Обратный переход (к режиму автоматической стабилизации) выполняется в последовательности:

- а) отключают вспомогательный регулятор;
- б) нажатием кнопки «А» станцию управления ВИП2 переводят в режим автоматической стабилизации;

- в) с помощью ручного задатчика ВИП2 выравнивают заданное значение переменной Y_1 с текущим (по показаниям 1-го и 2-го узлов индикации ВИП2);
- г) включают вспомогательный регулятор;

В некоторых случаях по условиям ведения технологического процесса требуется ограничить влияние корректирующего регулятора на величину задания вспомогательного. Тогда на входе внешнего задания ВИП2 устанавливают блок ограничения ПП11.1-М1 (или два блока при необходимости двухстороннего ограничения сигнала).

10.6. Системы приоритетного регулирования

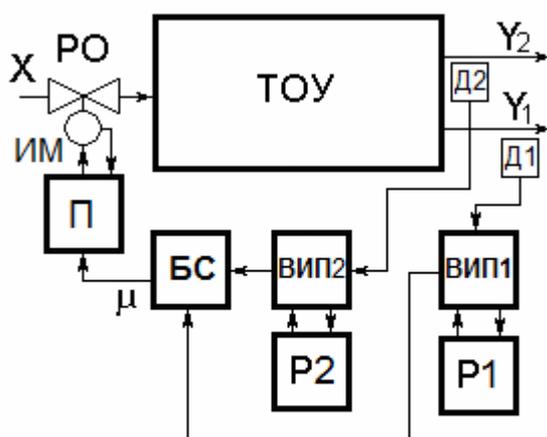


Рис.10.8. Функциональная структура системы приоритетного регулирования

Системы приоритетного регулирования используются в тех случаях, когда объект управления может функционировать в двух (или нескольких) самостоятельных режимах, четко различимых по уровням регулируемых параметров.

В системе приоритетного регулирования (рис.10.8) исполнительное устройство является общим для двух контуров регулирования. Приоритет того или иного контура задается блоком селектирования БС, в качестве которого используется

прибор ПФ4.5.1-М1. В зависимости от назначения системы регулирования БС может быть настроен на максимум или на минимум. В первом случае на исполнительное устройство подается больший из выходных сигналов регуляторов P1, P2, а во втором случае – меньший.

Рассматриваемая система может функционировать в трех режимах – в режиме ручного дистанционного управления, в режиме автоматической стабилизации и в режиме приоритетного регулирования.

В режимах ручного дистанционного управления и автоматической стабилизации в процессе управления задействован один контур, обладающий в данный момент приоритетом. Переключения режимов работы в этом случае производятся по такой же методике, как и в одноконтурной стабилизирующей системе.

В приоритетном режиме оба контура регулирования отрабатывают автоматическую стабилизацию регулируемого параметра. При переходе к приоритетному регулированию в режим автоматической стабилизации переводится сначала контур, обладающий приоритетом, а затем – второй контур, не имеющий приоритета.

10.7. Системы многосвязного регулирования

Системы многосвязного регулирования используются для управления объектами, состояние которых определяется несколькими взаимозависимыми регулируемыми величинами. В этом случае управление технологическим объектом с помощью системы, включающей несколько независимых контуров регулирования, может оказаться малоэффективным. С целью повышения качества работы системы управления между контурами регулирования организуется односторонняя или двухсторонняя связь (рис.10.9).

В простейшем случае вычислительные устройства ВУ, обеспечивающие взаимосвязь между контурами регулирования, выполняют дифференцирование регулирующих воздействий по времени. Такая взаимосвязь между контурами регулирования является динамической, поскольку в установившихся режимах взаимное влияние контуров регулирования отсутствует.

Алгоритм работы вычислительных устройств аналогичен алгоритму, используемому в системе комбинированного регулирования,

функциональная структура которой представлена на рис.10.3.

Вычислительное устройство включает в себя блоки ПФ2.1-М1 и ПФ1.1-М1. Первый обрабатывает операцию предварения, а второй – выделяет производную от регулирующего воздействия в одном контуре и суммирует ее с регулирующим воздействием в другом контуре.

Контур регулирования могут функционировать независимо друг от друга. В этом случае

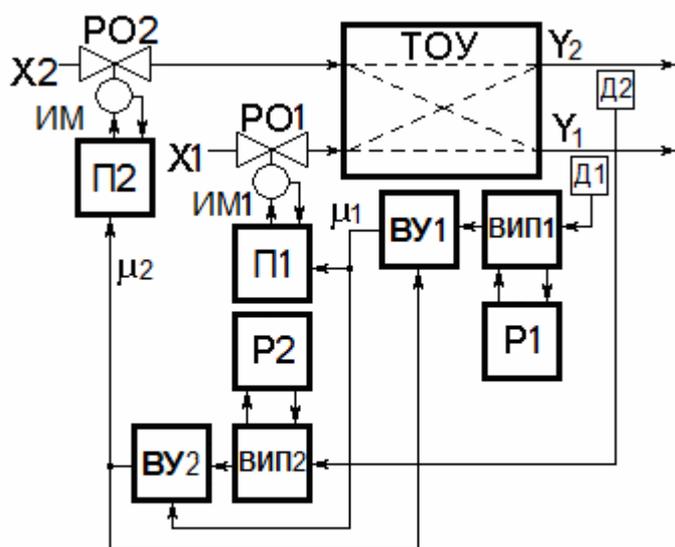


Рис. 10.9. Функциональная структура многосвязной системы регулирования

на входы отключающих реле блоков ПФ2.1-М1 подаются дискретные сигналы высокого уровня. В обоих контурах функция дифференцирования будет отключена и система функционирует как совокупность двух одноконтурных стабилизирующих систем. Переход к режиму многосвязного регулирования осуществляется последовательным включением функции дифференцирования в блоках ПФ2.1-М1 вычислительных устройств.

Список литературы

1. Балакирев, В.С. Применение средств пневмо- и гидроавтоматики в химических производствах / В.С. Балакирев А.Э. Софиев. – М. : Химия. 1984. – 176 с. : ил. – ISBN 5-3142-037-9.

2. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: справочное пособие / А.С. Ключев [и др.] под ред. А.С. Ключева.– Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1989. – 368 с. : ил. – ISBN 5-283-01481-9.
3. Пневматические системы автоматизации технологических процессов : руководящие материалы РМ-45-77 – М. : Проектмонтажавтоматика, 1977. – 160 с.
4. Иткина, Д.М. Исполнительные устройства систем управления в химической и нефтехимической промышленности / Д.М. Иткина. – М. :Химия, 1984. – 220 с. : ил. ISBN 5-334-01568-9.
5. Ибрагимов, И. А. Элементы и системы пневмоавтоматики : учеб. для вузов по специальности "Автоматизация и комплексная механизация хим.-технол. процессов". - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 1984. - 544 с. : ил.
6. Технические средства автоматизации. Ч.1. Пневматическая ветвь: учеб. пособие / М.М.Мордасов [и др.] Тамбов. Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. 2005. – 168 с.: ил – ISBN 5-8265-0406-4
7. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации: номенклатурный каталог. М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1984. Ч.1. 172 с.
8. Элементы и схемы пневмоавтоматики / Т.К. Берендс [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. 246 с.
9. Емельянов, А.И. Исполнительные устройства промышленных регуляторов/, А.И.Емельянов, В.А.Емельянов. – М.: Машиностроение, 1975. 224 с.

Электронные ресурсы:

1. <http://pnevmo-mashiny.ru/>
2. <http://www.tizpribor.ru/>
3. <http://www.klapan.ru>
4. <http://samson.ru>

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Общая характеристика пневматической ветви ГСП	3
2. Элементная база пневматических приборов и устройств.	7
2.1. Дроссели.	8
2.2. Пневмоемкости.	9
2.3. Пневмокамеры.	10
2.4. Сильфоны и мембраны.	11
2.5. Элементы сравнения.	12
2.6. Пневмоповторители	14
2.7. Трехмембранные реле.	16
2.8. Линейные пульсирующие дроссели.	17
2.9. Вспомогательные пневматические элементы.	18

3.	Типовые узлы обработки пневмосигналов.	19
3.1.	Узлы статических преобразований пневмосигналов.	19
3.2.	Узлы динамических преобразований пневмосигналов.	21
3.3.	Генераторы пневматических сигналов.	23
4.	Пневматические регуляторы.	25
4.1.	Позиционный регулятор ПР1.5.М1.	25
4.2.	П - регулятор ФР0098.	26
4.3.	ПИ - регулятор ФР0091.	29
4.4.	ПИД - регулятор ФР0095.	31
4.5.	Регуляторы соотношения ПР3.33-М1 и ПР3.34-М1.	34
5.	Пневматические функциональные блоки.	36
5.1	Прибор алгебраического суммирования ПФ1.1-М1.	36
5.2	Прибор умножения на постоянный коэффициент ПФ1.3.9-М1.	37
5.3	Прибор извлечения квадратного корня ПФ1.17-М1.	39
5.4	Устройство прямого предварения ПФ2.1-М1.	40
5.5	Устройство обратного предварения ПФ3.1-М1.	41
5.6	Устройство ограничения пневмосигналов ПП11.1-М1.	41
5.7	Прибор селектирования пневмосигналов ПФ4.5.1-М1.	42
6.	Пневматические вторичные измерительные приборы.	42
6.1.	Узел индикации вторичного измерительного прибора.	43
6.2.	Узел регистрации вторичного измерительного прибора.	44
6.3.	Станция управления вторичного измерительного прибора.	44
7.	Пневматические исполнительные устройства.	45
7.1.	Мембранные исполнительные механизмы.	45
7.2.	Позиционеры.	47
7.3.	Поршневые исполнительные механизмы.	48
7.4.	Основные параметры и характеристики пневматических исполнительных устройств.	49
8.	Пневматические линии связи.	51
9.	Одноконтурная стабилизирующая система автоматического регулирования.	52
10.	Типовые системы регулирования на базе пневматических регуляторов.	55
10.1.	Многоимпульсные системы регулирования.	56
10.2.	Системы комбинированного регулирования.	56
10.3.	Системы регулирования по вычисляемым параметрам.	57
10.4.	Системы следящего регулирования.	58
10.5.	Системы каскадно-связанного регулирования.	60
10.6.	Системы приоритетного регулирования.	61
10.7.	Системы многосвязного регулирования.	62
	Список литературы.	62