

М.М. Мордасов, А.В. Трофимов

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ**

**Москва
Издательство "Машиностроение-1"
2005**

М.М. Мордасов, А.В. Трофимов

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ**

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов – "Автоматизированные технологии и производства" (специальность "Автоматизация технологических процессов и производств" (химико-технологическая отрасль))

Москва
Издательство "Машиностроение-1"
2005

УДК [62-522.7:005](07)
ББК ←965-042.3-я73
М79

Рецензенты:

Профессор Московского государственного
технологического университета "Станкин"
А.Г. Схиртладзе

Заслуженный работник Высшей школы Российской Федерации,
профессор
Ю.Ф. Мартельянов

Мордасов М.М., Трофимов А.В.

М7 Анализ и синтез пневматических устройств: Учеб.
9 пособие. М.: Издательство "Машиностроение-1",
2005. 136 с.

Рассмотрены теоретические основы анализа статики и динамики устройств контроля и управления, построенных на элементах промышленной пневмоавтоматики. На конкретных примерах показана последовательность действий и приемов, позволяющих оценить свойства различных по сложности пневматических устройств.

Предназначено для студентов, изучающих дисциплину "Технические средства автоматизации", а также может быть полезно инженерам, занимающимся разработкой устройств автоматизации.

УДК [62-522.7:005](07)
ББК ←965-042.3-я73

ISBN 5-94275-224-9

©

Мордасов М.М., Трофимов
А.В., 2005

© Издательство "Машиностроение-1", 2005

Учебное издание

МОРДАСОВ Михаил Михайлович,
ТРОФИМОВ Алексей Владимирович

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 18.11.05

Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура Times New Roman. Объем: 7,9 усл. печ. л.; 7,8 уч.-изд. л.

Тираж 400 экз. С. 803^М

Издательство "Машиностроение", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в издательско-полиграфическом центре
Тамбовского государственного технического университета,
392000, Тамбов, Советская 106, к. 14

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- c – концентрация;
 d – диаметр, м;
 F, f – площадь, м²;
 G – массовый расход, кг/с;
 $h(t)$ – переходная функция, $h(t) = L^{-1}[W(s)1(s)]$;
 K – коэффициент усиления;
 k – постоянная Больцмана, Дж/К;
 L – прямое преобразование Лапласа;
 L^{-1} – обратное преобразование Лапласа;
 l – длина, м;
 M – масса газа, кг;
 N – сила, Н;
 N_a – число частиц газа;
 P – давление газа, Па;
 $P_{\text{абс}}$ – абсолютное давление, Па;
 $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па;
 R – газовая постоянная, Дж/(кг·К);
 Re – критерий Рейнольдса;
 s – комплексная переменная;
 T – абсолютная температура газа, К;
 t – время, с;
 U – скорость газа, м/с;
 V – объем, м³;
 $W(s)$ – передаточная функция;
 x – координата, м;
 $x(t)$ – входной сигнал объекта;
 $y(t)$ – выходной сигнал объекта;
 α, β, γ – проводимость дросселей, м·с;
 α_p – коэффициент расхода;
 Δ – разность величин;
 ε – поправочный множитель;
 η – динамическая вязкость газа, Па·с;
 θ – количество газа, кг;
 λ – коэффициент гидравлического сопротивления;
 μ – молярная масса газа, кг·моль;
 ξ – коэффициент гидравлических потерь;
 ρ – плотность газа, кг/м³;
 τ – постоянная времени, с;
 φ – функциональная зависимость;
 $1(t)$ – единичная ступенчатая функция, $1(t) = \begin{cases} 1, & t > 0; \\ 0, & t < 0. \end{cases}$

ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

 – питание сжатым воздухом, $P_{\text{пит}} = 0,14 \pm 0,014$ МПа;

- ∇ – связь с атмосферой;
- \ominus – пневмемкость;
- \odot – штуцер для подвода давления;
- \times – постоянный ламинарный дроссель;
- \otimes – переменный ламинарный дроссель;
- $\uparrow \downarrow$ – преобразователи "сопло-заслонка"

ВВЕДЕНИЕ

Работа любой технической системы автоматизации описывается статическими и динамическими характеристиками, определяющими зависимости выходного и входного сигналов в различных режимах работы.

Информация, полученная в результате статического и динамического анализа, позволяет разработать конструкцию, удовлетворяющую заданным требованиям, улучшить свойства работающих приборов с помощью введения корректирующих блоков, уменьшающих влияние систематической составляющей погрешности.

При исследовании автоматических устройств решаются два типа задач. По известной схеме устройства определяется переходный процесс, протекающий в устройстве, при подаче на его вход заданного сигнала. Это задача анализа устройств автоматики, решение которой позволяет определить зависимости выходного сигнала от входного по известной принципиальной или структурной схеме устройства. В других случаях потребуется, чтобы по заданным статическим или динамическим характеристикам была определена структура устройства, которое имеет эти характеристики. В этом случае имеем задачу синтеза.

Обе задачи в значительной мере связаны друг с другом, причем задача синтеза значительно труднее задачи анализа. Трудности решения задач синтеза определяется рядом причин. Прежде всего, решение задачи синтеза не является однозначным, так как одни и те же требования, предъявляемые к автоматическим устройствам, можно удовлетворить различными путями.

В рамках задачи синтеза автоматических приборов и регуляторов, требуется составить принципиальные схемы пневматических устройств, построенных на основе унифицированной системы элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭПА), имеющих заданные передаточные функции или статические характеристики.

Для понимания материала книги студент должен обладать знаниями по физике (сложение сил, условия равновесия, уравнения, описывающие состояние газа), математике (составление и решение дифференциальных уравнений), теории автоматического регулирования (типовые звенья автоматики, составление и преобразование структурных схем, преобразование Лапласа, определение передаточной функции по структурной схеме).

Книга состоит из трех глав, первые две из которых посвящены анализу процессов, протекающих в элементах пневмоавтоматики, а третья – синтезу пневматических устройств.

В первой главе выводятся уравнения расхода газа через ламинарный и турбулентный дроссели, описывается экспериментальный метод нахождения проводимости дросселя, вычисляется погрешность измерения проводимости дросселя, приводятся конкретные примеры расчета конструктивных параметров дросселей, рассматриваются задачи анализа устройств, построенных на дросселях и емкостях. На конкретном примере подробно изучается построение физической и математической моделей процесса измерения количества выделяющегося газа. Даются примеры анализа математической модели и определение ее адекватности происходящим процессам.

Во второй главе изучаются устройства, построенные на трех и пятимембранных элементах сравнения. Рассматриваются примеры построения и анализа структурных схем, составленных по принципиальным схемам пневматических устройств.

В третьей главе приводятся конкретные примеры синтеза пневматических устройств по заданным статическим характеристикам, передаточным функциям и заданному качеству протекания технологического процесса.

В конце каждой главы приведены вопросы для самостоятельной работы студентов, охватывающие весь объем представленной информации. Процесс подготовки ответов на эти вопросы способствует улучшению усвоения изучаемого материала. По материалам первых двух глав составлены тесты, в которых из четырех предложенных вариантов ответов на задание необходимо выбрать один правильный. Понимание заданий тестов и правильные ответы свидетельствуют о том, что студент имеет необходимый объем знаний для усвоения всей информации, приведенной в учебном пособии.

В книге рассматриваются модельные примеры. Такой подход позволит студентам относительно просто понять основные идеи, используемые при построении устройств, информация в которых представлена в давлении сжатого газа (воздуха). Изучив представленный материал, студенты будут подготовлены к анализу и синтезу не только устройств пневмоавтоматики, используемых в промышленности, но и устройств, при работе которых используют другие виды энергии: электрическую, гидравлическую, механическую.

1. АНАЛИЗ ДРОССЕЛЕЙ И ПНЕВМАТИЧЕСКИХ КАМЕР

В первой главе рассмотрены дросселирующие и накопительные элементы пневмоавтоматики и устройства, построенные на этих элементах. Получены структурные схемы и составлены математические описания процесса работы устройств. Приведены примеры расчета и метод экспериментального определения конструктивных параметров дросселей.

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ, ПНЕВМОЕМКОСТЕЙ И ПНЕВМОКАМЕР

Пневматические сопротивления, пневмоемкости, пневмоконденсаторы и пневмокамеры являются элементами пневмоавтоматики. На основе этих элементов, а также элементов сравнения, строятся разнообразные пневматические устройства контроля и управления [1, 2].

Пневматические сопротивления (дроссели) создают сопротивление течению газа (рис. 1.1.1). В схемах пневмоавтоматики они выполняют такую же роль, что и сопротивления в электрических схемах. Аналогия электрических и пневматических цепей приведена в прил. 1. Причиной движения газов через дроссель является разность давлений $P_1 - P_2$.

Пневматические сопротивления классифицируются по характеру течения газа, виду расходной характеристики и функциональному назначению.

По характеру течения газа пневмосопротивления подразделяются на турбулентные, ламинарные и смешенного типа.

В турбулентных пневмосопротивлениях дросселирование потока газа вызывается местными сопротивлениями на входе и потерями энергии на выходе. На величину потери давления не влияет действие сил трения при течении газа через сопротивление. Такие сопротивления представляют собой канал цилиндрической формы с малым отношением длины к диаметру. В канале цилиндрической формы, с большим отношением длины к диаметру, обеспечивается ламинарное движение газа. Потери давления в основном обуславливаются наличием трения в канале. Местные сопротивления на входе и потери давления на выходе не учитываются в виду их малости.

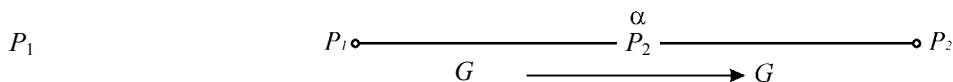


Рис. 1.1.1. Обозначение дросселя на схемах автоматики

К пневмосопротивлениям смешанного типа относятся сопротивления, работающие при любых течениях газа. Падение давления на сопротивлениях этого типа определяется как местными потерями, так и трением в канале.

Расходная характеристика пневмосопротивления определяет зависимость массового расхода газа через сопротивление от перепада давления на нем. По виду расходной характеристики пневмосопротивления разделяют на линейные и нелинейные.

По функциональному назначению пневмосопротивления разделяют на постоянные, переменные и управляемые. Постоянные пневмосопротивления представляют собой отверстия в тонкой пластине или цилиндрические каналы. Такие сопротивления имеют постоянную величину проводимости.

Переменные пневмосопротивления выполняются следующих типов: "цилиндр-конус", "конус-конус", "цилиндр-цилиндр", "поршень-канавка". Проводимость сопротивления определяется положением перемещающегося элемента.

В управляемых пневмосопротивлениях величина проводимости изменяется под действием какого-либо параметра автоматически. Сопротивления выполняются следующих типов: "сопло-заслонка", "конус-шарик", "цилиндр-шарик".

Пневмоемкости и пневмоконденсаторы применяют при создании устройств, реализующих различные временные операции (интегрирование, дифференцирование и т.д.), и предназначены для накопления определенного количества сжатого газа (воздуха). В пневмоемкости при постоянном объеме увеличение количества газа приводит к увеличению давления. Различают постоянные и переменные пневмоемкости.

В пневмоконденсаторе накопление газа осуществляется за счет изменения объема, происходящего пропорционально приложенной разности давлений.

Пневмокамеры (рис. 1.1.2) представляют собой соединение пневмоемкости и пневмосопротивлений [3].

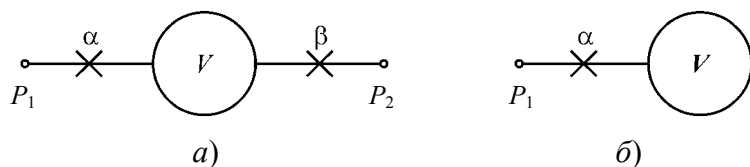


Рис. 1.1.2. Схемы проточной (а) и глухой (б) пневмокамер

В пневмоавтоматике применяют камеры со сквозным потоком, называемые проточными или междроссельными, пневмокамеры, в которых приток воздуха происходит только через одно сопротивление – глухие и изолированные, не имеющие связи с окружающей средой. Основные физические свойства воздуха приведены в прил. 2.

Пневмокамеры могут иметь постоянные и переменные дроссели, а также постоянный или переменный объем емкости.

Конструкции типовых звеньев и устройств пневмоавтоматики приведены в прил. 3.

1.2. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ПО ПНЕВМАТИЧЕСКИМ СОПРОТИВЛЕНИЯМ

В пневматических устройствах автоматики происходят перемещения газа от источника по соединительным трубкам, дросселям и емкостям.

Для описания процесса течения в газовой динамике используются четыре уравнения: уравнение движения (закон сохранения импульса), уравнение неразрывности (закон сохранения массы), уравнение сохранения энергии и уравнение состояния [4].

Уравнение движения для одномерного потока невязкой сжимаемой жидкости связывает изменение давления dP газа, плотность ρ , скорость U и изменение скорости dU газа:

$$dP + \rho U dU = 0. \quad (1.2.1)$$

Уравнение неразрывности при установившемся одномерном потоке газа выражает тот факт, что масса изолированной системы остается постоянной. При установившемся одномерном потоке уравнение имеет вид

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial x} = 0 \quad \text{или} \quad \rho U = \text{const}. \quad (1.2.2)$$

В соответствии с уравнением сохранения энергии изменение полной энергии объема газа равно сумме работ в единицу времени внешних массовых и поверхностных сил, приложенных к этому объему и его поверхности, сложенной с отнесенной к единице времени теплотой, подведенной извне. Если движущемуся по длинному трубопроводу газу не подводится теплота и механическая работа, то температура газа становится равной температуре стенок трубопровода и далее остается постоянной. Поэтому третье уравнение имеет вид

$$T = \text{const}. \quad (1.2.3)$$

Уравнение состояния описывает следующую закономерность в поведении газов: состояние всякого находящегося в равновесии газа определяется температурой T , давлением P и объемом V

$$f(T, P, V) = 0. \quad (1.2.4)$$

Связь между параметрами идеального газа определяется уравнением Менделеева-Клапейрона

$$PV = \frac{M}{\mu} RT \quad \text{или} \quad PV = Na kT. \quad (1.2.5)$$

Оно представляет собой уравнение состояния идеального газа, которое объединяет закон Бойля-Мариотта, закон Гей-Люссака и закон Авогадро. Уравнение Менделеева-Клапейрона – наиболее простое уравнение состояния, применимое с определенной степенью точности к реальным газам при низких давлениях и высоких температурах, когда они близки по своим свойствам к идеальным газам.

Используя формулу Дарси-Вейсбаха для определения потери полного напора для элементарного отрезка трубопровода и уравнения (1.2.1) – (1.2.5), записанные для двух произвольных сечений трубопровода, расположенных на некотором расстоянии l (рис. 1.2.1), можно определить массовый расход газа G :

$$G = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2) d}{RT \lambda l}}, \quad (1.2.6)$$

где d , l – диаметр и длина отрезка трубопровода; λ – коэффициент гидравлического сопротивления.

При ламинарном течении газа коэффициент гидравлического сопротивления для круглой трубы определяется выражением

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (1.2.7)$$

Критерий Рейнольдса запишем в виде

$$Re = \frac{Ud\rho}{\eta} = \frac{4G}{\pi d\eta}, \quad (1.2.8)$$

где η – динамическая вязкость газа, Па·с.

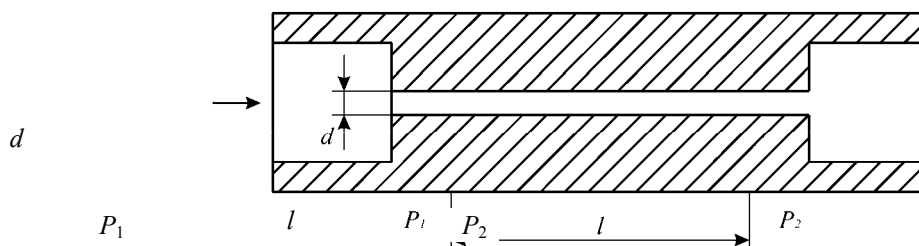


Рис. 1.2.1. Схема линейного пневматического сопротивления

Используя (1.2.6) – (1.2.8), получим

$$G = \frac{\pi d^4 (P_1^2 - P_2^2)}{256RT\eta l}.$$

Эта зависимость носит название формулы Пуазейля для сжимаемой жидкости. Она используется для определения расхода газа через капилляр при ламинарном течении. При малых перепадах давлений формулу Пуазейля можно представить в виде

$$G = \frac{\pi d^4 (P_1^2 - P_2^2)}{128\eta} = \alpha (P_1 - P_2),$$

где α – проводимость ламинарного дросселя, $\alpha = \frac{\pi d^4 \rho}{128\eta l}$, м·с; ρ – средняя плотность газа в дросселе,

$$\rho = \frac{P_1 + P_2}{2RT}, \text{ кг/м}^3.$$

Рассуждая аналогичным образом, для турбулентного дросселя получим расходную характеристику следующего вида:

$$G = \alpha_p \varepsilon F \sqrt{2\rho_1 (P_1 - P_2)}.$$

Таким образом, для ламинарных дросселей расход газа пропорционален разности давлений на нем, а для турбулентных дросселей – корню квадратному из этой разности.

1.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ДРОССЕЛЯ

При подаче на вход пневмокамеры ступенчатого сигнала (рис. 1.3.1) с амплитудой P_0 выходной сигнал изменяется по следующему закону:

$$P_{\text{вых}}(t) = P_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right). \quad (1.3.1)$$

В момент времени t_1 измерим величину выходного давления $P_{\text{вых}}(t_1) = P_1$. Тогда из выражения (1.3.1) получим

$$t_1 = \tau \ln \frac{P_0}{P_0 - P_1}. \quad (1.3.2)$$

Для пневмокамеры постоянная времени τ определяется объемом емкости и проводимостью дросселя:

$$\tau = \frac{V}{RT\alpha}. \quad (1.3.3)$$

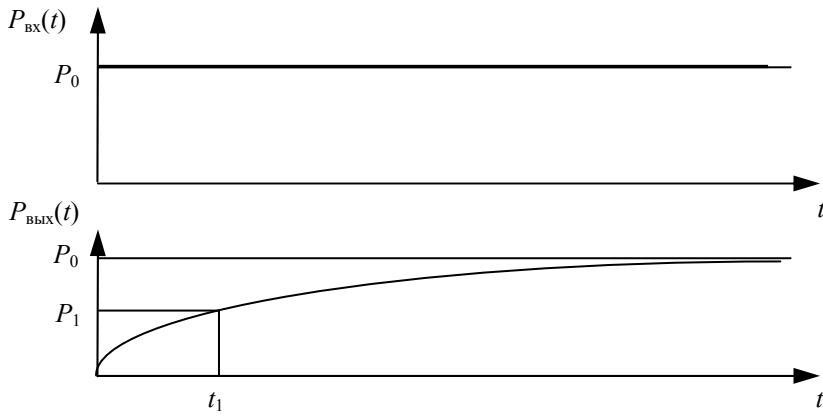


Рис. 1.3.1. Изменения входного и выходного сигналов в пневмокамере

Из (1.3.2) и (1.3.3) получим

$$\alpha = \frac{V}{RTt_1} \ln \frac{P_0}{P_0 - P_1}. \quad (1.3.4)$$

Таким образом, при подаче известного входного сигнала P_0 , измерив в некоторый момент времени t_1 величину выходного давления $P_{\text{вых}}(t_1) = P_1$, по формуле (1.3.4) возможно определить проводимость дросселя.

Установка (рис. 1.3.2) для экспериментального определения проводимости дросселя содержит датчик 1, пневмотумблер 2, манометры 3 и 4, дроссель 5 и емкость 6. Датчиком 1 выставляется давление P_0 . Тумблером 2 подается входное давление на дроссель 5 и емкость 6. Тот же момент включается секундомер. В некоторый момент времени t_1 фиксируется показание манометра 4. По формуле (1.3.4) определяется искомая проводимость.

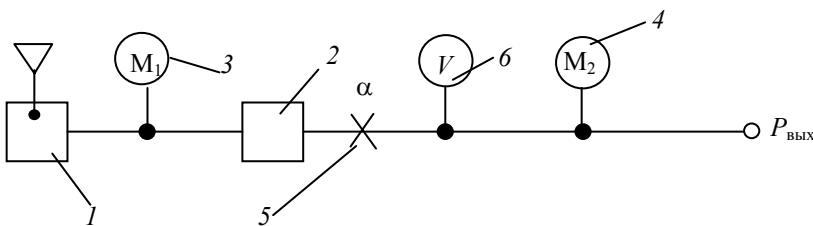


Рис. 1.3.2. Схема экспериментальной установки для определения проводимости дросселя

Погрешность косвенных измерений проводимости дросселя вычисляется по формуле (1.3.5). В соответствии с общепринятой методикой [5]

$$\Delta y = \left(\sum \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.3.5)$$

где Δy – погрешность косвенных измерений функции y ; Δx_i – абсолютная погрешность измерения аргумента x_i , определенная с помощью прямых измерений.

Формула (1.3.5) в соответствии с (1.3.4) примет следующий вид:

$$\Delta\alpha = \left[\left(\frac{\partial\alpha}{\partial V} \Delta V \right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial R} \Delta R \right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial T} \Delta T \right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial t_1} \Delta t_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial P_0} \Delta P_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial P_1} \Delta P_1 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

где $\frac{\partial\alpha}{\partial V} = \frac{1}{RTt_1} \ln \frac{P_0}{P_0 - P_1}$; $\frac{\partial\alpha}{\partial R} = \frac{-V}{R^2 T t_1} \ln \frac{P_0}{P_0 - P_1}$; $\frac{\partial\alpha}{\partial T} = \frac{-V}{RT^2 t_1} \ln \frac{P_0}{P_0 - P_1}$; $\frac{\partial\alpha}{\partial t_1} = \frac{-V}{RT t_1^2} \ln \frac{P_0}{P_0 - P_1}$; $\frac{\partial\alpha}{\partial P_0} = \frac{-P_1 V}{RT t_1 P_0 (P_0 - P_1)}$; $\frac{\partial\alpha}{\partial P_1} = \frac{V}{RT t_1 (P_0 - P_1)}$.

В табл. 1.3.1 приведены значения модулей погрешности косвенных измерений α при $V = (50,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; $R = 287 \pm 0,1 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $t_1 = 15 \pm 0,1 \text{ с}$; $P_0 = (1,400 \pm 0,003) \cdot 10^5 \text{ Па}$; $P_1 = (0,600 \pm 0,003) \cdot 10^5 \text{ Па}$; $T = 293 \pm 1 \text{ К}$.

1.3.1. Составляющие погрешности измерения проводимости дросселя

$\frac{\partial\alpha}{\partial V} \Delta V$	$\frac{\partial\alpha}{\partial R} \Delta R$	$\frac{\partial\alpha}{\partial T} \Delta T$	$\frac{\partial\alpha}{\partial t_1} \Delta t_1$	$\frac{\partial\alpha}{\partial P_0} \Delta P_0$	$\frac{\partial\alpha}{\partial P_1} \Delta P_1$	$\Delta\alpha$	α	$\delta\alpha$, %
$10^{-12}, \text{ м}\cdot\text{с}$								
0,222	0,008	0,076	0,148	0,064	0,149	0,32 1	22,1 8	1,4

1.4. РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ДРОССЕЛЕЙ

По заданным параметрам потока газа можно определить конструктивные параметры пневматического дросселя (диаметр и длину). Основные физические свойства воздуха при нормальном давлении приведены в прил. 2.

Основные формулы, используемые при решении задач. Расходная характеристика турбулентного $G = \alpha_p \varepsilon F \sqrt{2\rho_1(P_1 - P_2)}$ и ламинарного дросселей $G = \frac{\pi d^4 (P_1 - P_2) (P_1 + P_2)}{128 \eta l} = \frac{\pi d^4 \rho}{128 \eta l} (P_1 - P_2)$.

Задача 1. Определить диаметр турбулентного дросселя, если массовый расход газа через него $G = 32 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$; давления: $P_1 = 1,260 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $P_2 = 1,240 \cdot 10^5 \text{ Па}$; температура, при которой эксплуатируется дроссель, равна $20 \text{ }^\circ\text{C}$; атмосферное давление равно $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Так как $F = \frac{\pi d^2}{4}$, тогда $d = \sqrt{\frac{4G}{\pi \alpha_p \varepsilon \sqrt{2\rho_1(P_1 - P_2)}}}$.

Если перепад давления на дросселе мал и составляет 2 кПа, то газ – несжимаемая жидкость и $\varepsilon = 1$. Из уравнения состояния газа для изотермического процесса определим ρ_1 :

$$\rho_1 = \rho_{1н} \frac{P_1}{P_{н}} = 1,205 \frac{1,260 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5} = 1,5 \text{ кг/м}^3,$$

где $P_{н}$ – давление, принятое за нормальное, Па; $\rho_{1н}$ – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 .

Коэффициент расхода α_p вычисляем по формуле $\alpha_p = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi}}$, в которой для дросселя с острой входной кромкой значение ξ принимаем равным 0,5, тогда $\alpha_p = 0,816$.

Используя найденные и заданные значения, получим

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 32 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,816 \sqrt{2 \cdot 1,5 \cdot 2000}}} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Задача 2. Определить длину l капилляра, имеющего диаметр $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м, при расходе газа через него $G = 2,7 \cdot 10^{-4}$ кг/с. Перепад давления на капилляре 2 кПа; температура окружающей среды 20 °С.

Считая, что $\rho = \text{const}$ и равна плотности при нормальных условиях, получим выражение для объемного расхода газа через капилляр:

$$G = \frac{\pi d^4 \rho}{128 \eta l} (P_1 - P_2);$$

$$l = \frac{\pi d^4 \rho}{128 \eta G} (P_1 - P_2) = \frac{3,14 \cdot 1,2^4 \cdot 10^{-12} \cdot 1,205 \cdot 2000}{128 \cdot 184 \cdot 10^{-7} \cdot 2,7 \cdot 10^{-4}} = 24,7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Задача 3. Определить проводимость капилляра, работающего при температуре 20 °С в диапазоне давлений 0...2 кПа, если его диаметр $d = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м, а длина $l = 55 \cdot 10^{-3}$ м.

$$\alpha = \frac{\pi d^4 \rho}{128 \eta l} = \frac{3,14 \cdot 0,4^4 \cdot 10^{-12} \cdot 1,205}{128 \cdot 184 \cdot 10^{-7} \cdot 55 \cdot 10^{-3}} = 74,8 \cdot 10^{-11} \text{ м} \cdot \text{с.}$$

Задача 4. Определить, как изменится величина ламинарного сопротивления, работающего при $t = 0$ °С, если давления до и после сопротивления равны $1,03 \cdot 10^5$ Па и $1,02 \cdot 10^5$ Па и через него прокачивать вместо воздуха кислород?

Так как перепад давления на сопротивлении мал, то газ можно рассматривать как несжимаемую жидкость.

Сопротивление для воздуха (в) и кислорода (к):

$$R_{\text{в}} = \frac{128 \eta_{\text{в}} l}{\pi d^4 \rho_{\text{в}}}, \quad R_{\text{к}} = \frac{128 \eta_{\text{к}} l}{\pi d^4 \rho_{\text{к}}}.$$

Выражая $\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{к}}$ через среднее давление $P_{\text{ср}}$ и температуру T :

$$\rho_{\text{в}} = \rho_{\text{вн}} \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{н}}} \frac{T_{\text{н}}}{T}, \quad \rho_{\text{к}} = \rho_{\text{кн}} \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{н}}} \frac{T_{\text{н}}}{T},$$

находим $\frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{в}}} = \frac{\eta_{\text{к}} \rho_{\text{в}}}{\eta_{\text{в}} \rho_{\text{к}}}.$

При температуре 0 °С и давлении $1,02 \cdot 10^5$ Па из таблиц физико-химических свойств определяем:

$$\eta_{\text{к}} = 0,19 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad \eta_{\text{в}} = 0,17 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\rho_{\text{к}} = 1,429 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_{\text{в}} = 1,293 \text{ кг/м}^3.$$

Вычисляя отношение $R_{\text{к}}/R_{\text{в}}$, получим

$$\frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{в}}} = \frac{0,19 \cdot 10^{-4} \cdot 1,293}{0,17 \cdot 10^{-4} \cdot 1,429} = 1,01.$$

1.5. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ, ПОСТРОЕННЫХ НА ДРОССЕЛИРУЮЩИХ И НАКОПИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Рассмотрим работу дроссельного устройства, построенного на двух дросселях 1 и 2 (рис. 1.5.1) с проводимостями α и β , соответственно. На дроссель 1 подается входное давление P_1 , а вход дросселя 2 соединен с атмосферой. Выходной сигнал $P_{\text{вых}}$ отбирается из междроссельной камеры, причем на выходе отсутствует расход газа ($G_{\text{вых}} = 0$), т.е. осуществляется так называемый потенциальный выход. Формирование потенциального выхода происходит путем подключения к междроссельной камере пневмоповторителя. Если в устройстве междроссельная камера подключается к емкости или соединительные линии обладают существенной емкостью, то необходимо это учитывать.

Для ламинарных дросселей справедлив закон Ома, т.е. расход через дроссель пропорционален перепаду давления на дросселе, причем коэффициент пропорциональности называется проводимостью дросселя:

$$G_1 = \alpha (P_1 - P_{\text{вых}}); \quad G_2 = \beta (P_{\text{вых}} - P_{\text{атм}}). \quad (1.5.1)$$

В междроссельной камере не происходит накопления воздуха и из этой камеры не стравливается воздух в атмосферу. Поэтому для нее справедливо первое правило Кирхгофа, которое для данной схемы будет звучать так: в установившемся режиме сумма входящих расходов равна сумме выходящих расходов:

$$G_1 = G_2 + G_{\text{ВЫХ}} \quad (1.5.2)$$

Из (1.5.1) и (1.5.2) вытекает зависимость выходного давления от входного:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} P_1 = \kappa P_1, \quad \kappa = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}.$$

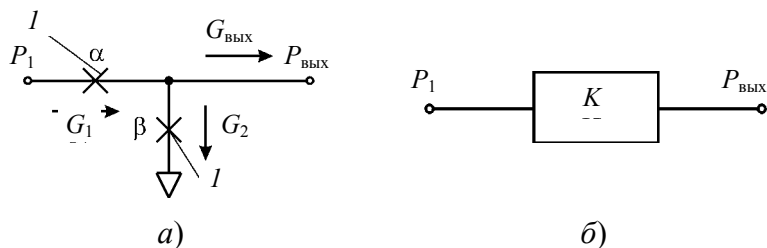


Рис. 1.5.1. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного делителя

Рассмотренное устройство получило название дроссельного делителя вследствие того, что в устройстве осуществляется деление входного давления. Определение "дроссельный" поясняет, что схема выполнена на дросселях, т.е. на пневматических сопротивлениях. На структурной схеме дроссельный делитель представляет собой усилительное звено с коэффициентом, равным отношению проводимости дросселя на входе к сумме проводимостей двух дросселей.

Проведем анализ пневмокамеры, собранной на двух дросселях и емкости (рис. 1.5.2). Получили схему дроссельного делителя, нагруженного емкостью.

Для ламинарных дросселей справедлива линейная зависимость между перепадом давления на дросселе и расходом газа через него (закон Ома): $G_1 = \alpha(P_1 - P_{\text{ВЫХ}})$; $G_2 = \alpha(P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{АТМ}})$. Для узла схемы (точка А) сумма входящих расходов равна сумме выходящих расходов (первое правило Кирхгофа). Равенство входящих выходящих расходов объясняется тем фактом, что в точке А не происходит накопление количества газа или вывод газа из устройства. В схеме накопление газа происходит в емкости, а вывод газов из устройства происходит через дроссель β : $G_1 = G_2 + G_3$.

В устройстве выходной сигнал отбирается из емкости в виде давления воздуха, при этом $G_{\text{ВЫХ}} = 0$.

Состояние газа в емкости описывается уравнением Менделеева-Клапейрона: $P_{\text{ВЫХ}} V = R\theta T$.

Опишем процессы в устройстве (пневмокамере), выполненном из рассматриваемых элементов. Расход G_3 поступает в емкость и увеличивает количество θ газа в ней. Найдем зависимость между расходом и количеством газа. Расход G_3 переменный. Выделим такой промежуток времени Δt , в который можно считать, что расход G_3 постоянен. Тогда за промежуток времени Δt при величине расхода G_3 в емкости количество газа увеличивается на $\Delta\theta$: $G_3\Delta t = \Delta\theta$ или $\Delta\theta/\Delta t = G_3$.

Для того, чтобы не быть связанным с произвольным отрезком времени, устремим этот промежуток времени к нулю: $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt}$ или $\frac{d\theta}{dt} = G_3$.

Получается дифференциальное уравнение:

$$\tau \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} + P_{\text{ВЫХ}} = \kappa P_1, \quad \tau = \frac{V}{(\alpha + \beta)RT}, \quad \kappa = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}.$$

По принципиальной схеме и математическому описанию устройства составим структурную схему (рис. 1.5.2), представляющую собой последовательно соединенные усилительное и апериодическое звенья.

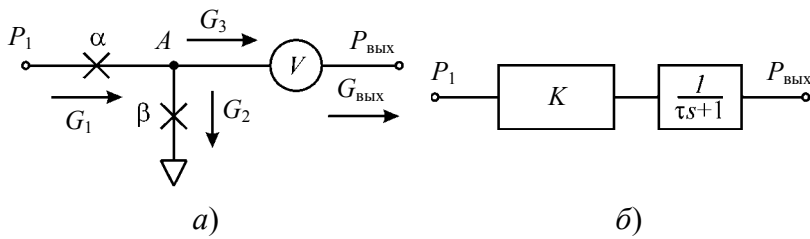


Рис. 1.5.2. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного делителя, нагруженного емкостью

При $P_1(t) = P_0 \cdot 1(t)$ и $P_{\text{вых}}(0) = 0$ решением дифференциального уравнения является $P_{\text{вых}}(t) = \kappa P_0 \left(1 - \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \right)$.

Таким образом, чем больше постоянная времени апериодического звена, тем длительнее переходной процесс.

Рассмотренное устройство, собранное на емкостях и дросселях, представляет собой последовательно соединенные усилительное звено с коэффициентом передачи меньше единицы и апериодическое звено, постоянная времени которого пропорциональна объему емкости и обратно пропорциональна сумме проводимостей дросселей. Устройство широко применяется с элементами УСЭППА (прил. 4).

При исследовании устройств автоматики используется передаточная функция $W(s)$, где s – произвольная комплексная величина [6].

Передаточной функцией элемента называется отношение лапласова изображения выходного сигнала к лапласову изображению соответствующего входного сигнала

$$W(s) = \frac{L[P_{\text{вых}}(t)]}{L[P_{\text{вх}}(t)]} = \frac{P_{\text{вых}}(s)}{P_{\text{вх}}(s)},$$

где символ L означает преобразование Лапласа. Элемент находится при нулевых начальных условиях.

Преобразование Лапласа, проводимое над функцией $f(t)$ и обращающее ее в функцию $F(s)$, определяется следующим образом:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt.$$

Такое преобразование над функцией $f(t)$ сокращенно обозначается так:

$$F(s) = L[f(t)].$$

Для определения передаточной функции заданного устройства необходимо преобразовать уравнение, связывающее выходной сигнал с входным сигналом. Преобразование Лапласа для функций и типовых математических операций приведено в прил. 5 и 6.

Преобразовав по Лапласу дифференциальное уравнение, описывающее дроссельный делитель, нагруженный емкостью (рис. 1.5.2), получим

$$\tau s P_{\text{вых}}(s) + P(s) = \kappa P_1(s).$$

При выполнении преобразования Лапласа над указанным уравнением подразумевается, что дроссельный делитель находится в состоянии покоя до появления входного сигнала. Это описывается нулевыми начальными условиями в дифференциальном уравнении.

Найдем зависимость $P_{\text{вых}}(s)$ от $P_1(s)$:

$$P_{\text{вых}}(s) = P_1(s) \frac{\kappa}{\tau s + 1}.$$

Передаточная функция устройства $W(s) = \frac{\kappa}{\tau s + 1}$.

При подаче входного сигнала $P_{\text{вх}}(t) = P_0 \cdot 1(t)$, значение выходного сигнала (рис. 1.5.3) в установившемся режиме определим, используя теорему о конечном значении [6]:

$$P_{\text{вых}}(s) = W(s)P_{\text{вх}}(s) = \frac{\kappa}{\tau s + 1} \frac{P_0}{s};$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{\text{вых}}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s P_{\text{вых}}(s) = \kappa P_0.$$

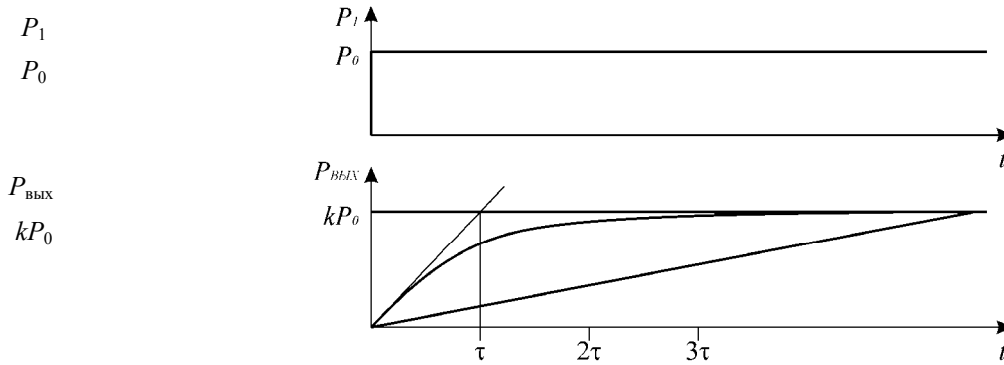


Рис. 1.5.3. Изменение входного и выходного давления в устройстве

Значения выходного давления в установившемся режиме, рассчитанные по двум вариантам, совпадают. Это свидетельствует о правильности проведенного анализа статического режима работы.

Если в дроссельном делителе (рис. 1.5.1) на вход дросселя β подадим давление P_2 , то получим дроссельный сумматор (рис. 1.5.4).

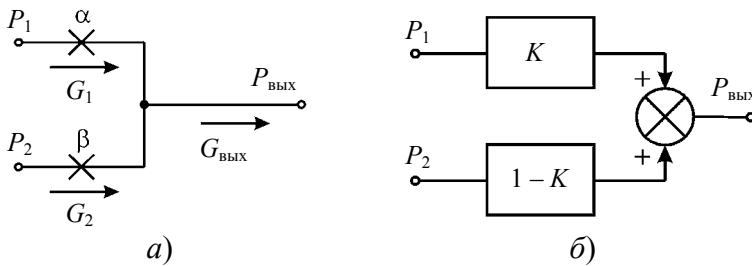


Рис. 1.5.4. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного сумматора

Рассуждая аналогичным образом, как и для дроссельного делителя, расходы газа по дросселям сумматора определим в виде:

$$G_1 = \alpha(P_1 - P_{\text{вых}}); \quad G_2 = \beta(P_2 - P_{\text{вых}}); \quad G_1 + G_2 = G_{\text{вых}} = 0. \quad (1.5.3)$$

Из (1.5.3) получается следующая зависимость выходного давления от входного:

$$P_{\text{вых}} = KP_1 + (1 - K)P_2, \quad K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}.$$

Таким образом, схема осуществляет суммирование входных сигналов с коэффициентами, определяемыми проводимостями дросселей.

При подключении дроссельного сумматора к пневмоемкости (рис. 1.5.5) и отборе из нее выходного сигнала в потенциальной форме, происходящие процессы описываются уравнениями:

$$G_1 = \alpha(P_1 - P_{\text{вых}}); \quad G_2 = \beta(P_2 - P_{\text{вых}});$$

$$G_1 + G_2 = G_3; \quad G_{\text{вых}} = 0; \quad (1.5.4)$$

$$G_3 = \frac{d\theta}{dt}; \quad P_{\text{вых}}V = \theta RT.$$

Из (1.5.4) получим дифференциальное уравнение

$$\tau \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} + P_{\text{ВЫХ}} = KP_1 + (1-K)P_2,$$

где $\tau = \frac{V}{(\alpha + \beta)RT}$; $K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$.

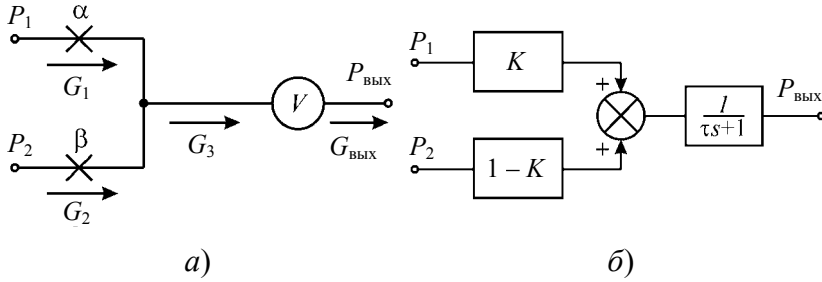


Рис. 1.5.5. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного сумматора, нагруженного на емкость

Процессы, протекающие в устройстве, имеющем в своем составе одну емкость, описываются дифференциальными уравнениями первого порядка.

При подаче на входы давлений $P_1(t) = P_1 \cdot 1(t)$ и $P_2(t) = P_2 \cdot 1(t)$ (рис. 1.5.6) выходной сигнал примет следующий вид:

$$P_{\text{ВЫХ}} = (KP_1 + (1-K)P_2) \left(1 - \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \right).$$

В установившемся режиме $P_{\text{ВЫХ}}(\infty) = KP_1 + (1-K)P_2$.

По структурной схеме найдем передаточную функцию $W_1(s)$ по каналу P_1 и $W_2(s)$ по каналу P_2 :

$$W_1(s) = \frac{K}{\tau s + 1}; \quad W_2(s) = \frac{1-K}{\tau s + 1}.$$

Из выражения передаточной функции определим выходной сигнал в установившемся режиме

$$P_{\text{ВЫХ}}(s) = W_1(s)P_1(s) + W_2(s)P_2(s),$$

из которого, используя теорему о конечном значении, получим

$$P_{\text{ВЫХ}}(\infty) = KP_1 + (1-K)P_2.$$

Значения выходного сигнала, вычисленные по двум вариантам, совпали, что свидетельствует о правильно проведенном анализе статического режима работы дроссельного сумматора, подключенного к пневмоемкости.

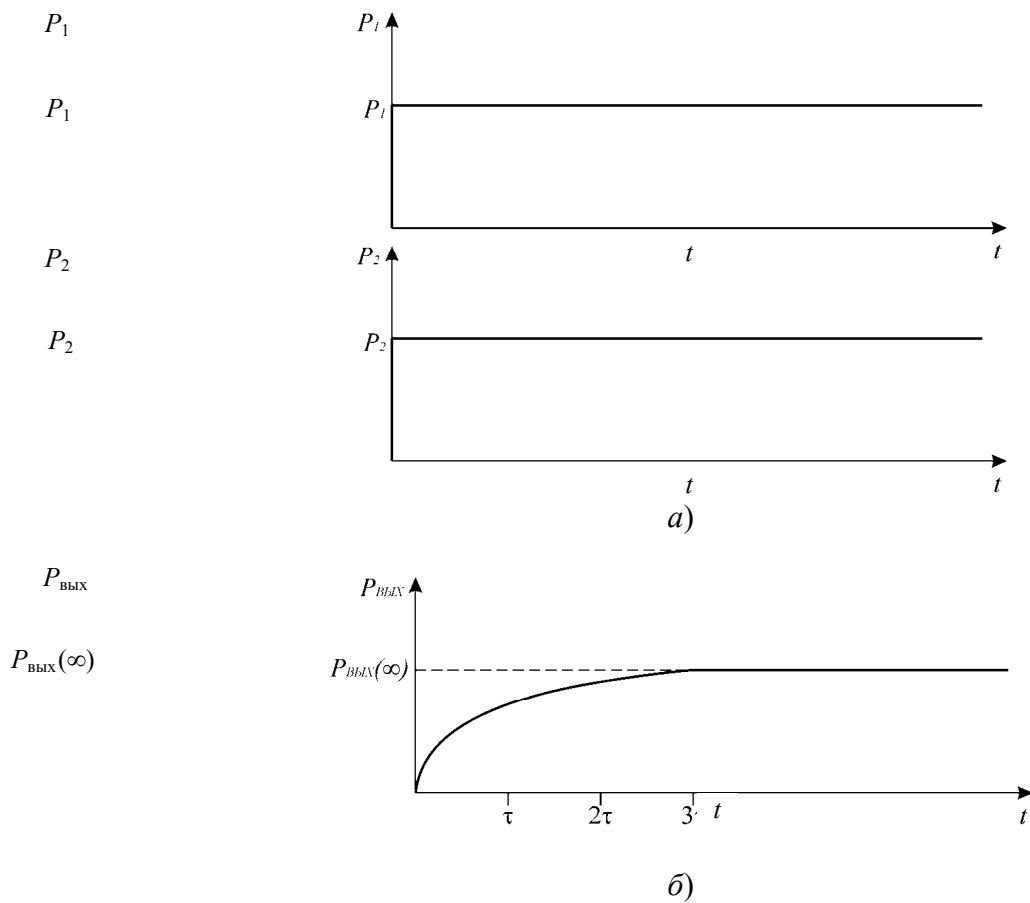


Рис. 1.5.6. Временные зависимости выходных и входных давлений дроссельного сумматора:

a – входные давления; *б* – выходное давление

Рассмотрим дроссельный сумматор, имеющий n входов, нагруженный на емкость V (рис. 1.5.7).

По аналогии с ранее рассмотренной схемой дроссельного сумматора происходящие процессы будут описываться следующими уравнениями:

$$G_i = \alpha_i(P_i - P_{\text{ВЫХ}}); \quad G_{n+1} = \frac{d\theta}{dt}; \quad \sum_{i=1}^n G_i = G_{n+1};$$

$$G_{\text{ВЫХ}} = 0; \quad P_{\text{ВЫХ}}V = \theta RT, \quad i = 1, \dots, n. \quad (1.5.5)$$

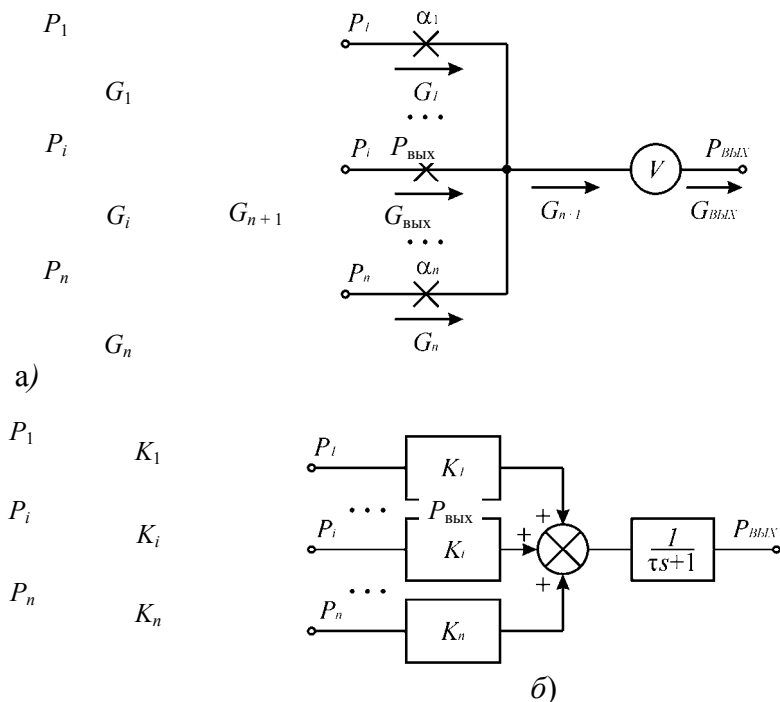


Рис. 1.5.7. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного сумматора с n входами, нагруженного на емкость

Из (1.5.5) получим:

$$\tau \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} + P_{\text{ВЫХ}} = \sum_{i=1}^n K_i P_i, \quad \tau = \frac{V}{RT \sum_{i=1}^n \alpha_i}, \quad K_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{j=1}^n \alpha_j}, \quad i = 1, \dots, n.$$

В этом случае получаем аналогичные дифференциальные уравнения и передаточную функцию, что и для дроссельного сумматора на два входа.

Передаточная функция $W_i(s)$ по каналу P_i имеет следующий вид:

$$W_i(s) = \frac{K_i}{\tau s + 1}.$$

Выходной сигнал определяется по формуле

$$P_{\text{ВЫХ}}(s) = \sum_{i=1}^n W_i(s) P_i(s).$$

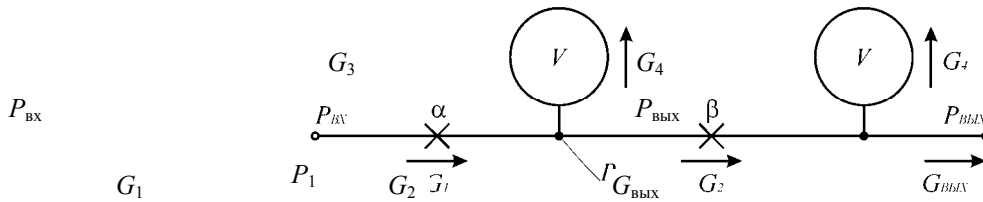


Рис. 1.5.8. Принципиальная схема пневматического инерционного звена второго порядка

Проведем анализ устройства, построенного с использованием независимых пневмоемкостей (рис. 1.5.8).

Процессы, протекающие в устройстве, описываются следующими уравнениями:

$$G_1 = \alpha(P_{\text{ВХ}} - P_1); \quad G_2 = \beta(P_1 - P_{\text{ВЫХ}});$$

$$G_1 = G_2 + G_3; \quad G_2 = G_4 + G_{\text{ВЫХ}}; \quad G_{\text{ВЫХ}} = 0; \quad (1.5.6)$$

$$G_3 = \frac{d\theta_1}{dt}; \quad G_4 = \frac{d\theta_2}{dt}; \quad P_1 V = \theta_1 RT; \quad P_{\text{ВЫХ}} V = \theta_2 RT.$$

Из (1.5.6) получаем дифференциальное уравнение, описывающее изменение выходного сигнала устройства:

$$\tau_1 \tau_2 \frac{d^2 P_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + (2\tau_1 + \tau_2) \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} + P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ}},$$

где $\tau_1 = \frac{V}{\alpha RT}$; $\tau_2 = \frac{V}{\beta RT}$.

Процессы, протекающие в устройстве, имеющем в своем составе два последовательно соединенных независимых накопителя воздуха, описываются дифференциальным уравнением второго порядка. Две емкости (рис. 1.5.8), последовательно соединенные через дроссель β , являются независимыми накопителями, так как они не могут быть преобразованы в один накопитель.

Вид решения дифференциального уравнения

$$a_2 \frac{d^2 P_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + a_1 \frac{dP_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + a_0 P_{\text{ВЫХ}}(t) = b$$

зависит от дискриминанта характеристического уравнения:

$$a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0 = 0.$$

Общее решение дифференциального уравнения при нулевых начальных условиях $P_{\text{вых}}(0) = 0$, $P'_{\text{вых}}(0) = 0$ приведено в табл. 1.5.1.

1.6. ПНЕВМОКАМЕРЫ, ПОДКЛЮЧЕННЫЕ К ИСТОЧНИКУ РАСХОДА ГАЗА

Рассмотрим физическую и математическую модели процесса, происходящего в измерительной системе при накоплении газа.

1.6.1. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

Отберем заданный объем $V_{\text{ж}}$ жидкости из реакционного аппарата. Над поверхностью этой жидкости находится объем газа V_1 . Из жидкости, например, в результате химической реакции начинают выделяться газы. Давление P_1 в объеме V_1 увеличивается. По мере повышения давления P_1 меньшее количество газа выделяется из жидкости. В соответствии с принципом Ле Шателье-Брауна повышение давления стимулирует тот из процессов, который приводит к уменьшению объема, а удаление из зоны реакции ее продуктов способствует протеканию прямой реакции. Поэтому целесообразно в процессе измерения удалять из зоны реакции один из ее продуктов (газы). Это способствует протеканию прямой реакции.

К объему V_1 подключим через дроссель α измерительную емкость объемом V_2 . В пневмоавтоматике используются ламинарные и турбулентные дроссели. В связи с тем, что желательно построить более простой измерительный прибор, то в данной работе целесообразнее использовать ламинарный дроссель.

После заполнения газом емкости V_2 до заданного давления следует процесс разгрузки этой емкости через второй ламинарный дроссель β в третью сборную емкость V_3 .

Таким образом, физическую модель (рис. 1.6.1) прохождения газа в измерительной системе можно представить как соединенные последовательно источник газовыделений, емкость V_1 , ламинарный дроссель α , нормально-закрытый клапан, емкость V_2 , нормально-открытый клапан, ламинарный дроссель β и емкость V_3 .

Составленная в таком виде физическая модель, построенная на элементах, широко используемых в пневмоавтоматике, отражает основные физические процессы, протекающие в исследуемой измерительной системе, и позволяет составить математическое описание процесса в виде достаточно простых уравнений.

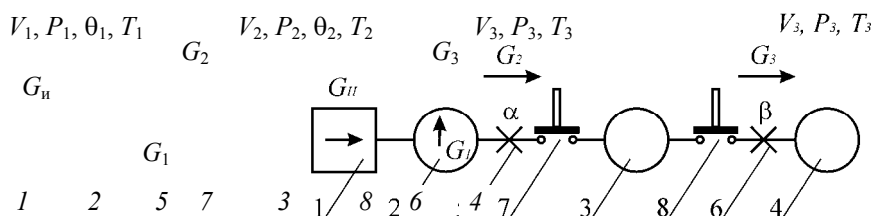


Рис. 1.6.1. Физическая модель процесса в измерительной системе:

1 – источник газовыделений; 2, 3, 4 – емкости;
5, 6 – ламинарные дроссели; 7, 8 – клапаны

1.6.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

Осуществим математическое описание процесса, протекающего в системе, физическая модель которой, при введенных допущениях и определенных ограничениях на конструктивные величины, представлена выше.

Будем считать, что в переходном процессе расход газа через дроссель в каждый фиксированный момент времени является таким же, каким он был бы при данном перепаде давлений в установившемся режиме; течение газа изотермическое и ламинарное.

Первое допущение основывается на том, что в рассматриваемой физической модели объем емкостей V_1 и V_2 ($50 \dots 200 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$) существенно больше объема дросселя ($1 \dots 20 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$). Второе допущение основано на том, что разница во времени заполнения емкости V_2 в политропическом, реально имеющем место в данном случае, и принятом изотермическом процессах при изучаемых перепадах давления мала (разница 0,01 %). Третье допущение будет справедливо, если текущее значение критерия Рейнольдса меньше критического значения, $Re_{кр} = 1400$.

Учитывая эти допущения, течение газа в измерительной системе описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} P_1(t)V_1(t) &= \theta_1(t)RT; & P_1(0) &= P_{10}; & P_2(0) &= P_{20}; \\ P_2(t)V_2(t) &= \theta_2(t)RT; & V_1(0) &= V_{10}; & V_2(0) &= V_{20}; \\ G_n(t) &= G_1(t) + G_2(t); & T &= \text{const}; \end{aligned} \quad (1.6.1)$$

$$G_1(t) = \frac{d\theta_1(t)}{dt}; \quad G_n(0) = G_0; \quad G_2(t) = \frac{d\theta_2(t)}{dt};$$

$$G_1(0) = 0; \quad G_2(0) = 0; \quad G_2(t) = \alpha(P_1(t) - P_2(t)).$$

Из системы (1.6.1) получим систему линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, решение которой в квадратурах в общем случае найти не удастся [7]:

$$\begin{aligned} V_1(t) \frac{dP_1(t)}{dt} + P_1(t) \left(\frac{dV_1(t)}{dt} + \alpha RT \right) &= \alpha RTP_2(t) + RTG_n(t); \\ V_2(t) \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) \left(\frac{dV_2(t)}{dt} + \alpha RT \right) &= \alpha RTP_1(t); \end{aligned} \quad (1.6.2)$$

$$P_1(0) = P_{10}; \quad P_2(0) = P_{20}; \quad V_1(0) = V_{10}; \quad V_2(0) = V_{20}; \quad G_n(0) = G_0; \quad T = \text{const}.$$

При анализе проходящих процессов наибольший интерес представляет исследование влияния изменения потенциала на выходе накопителя с сохранением или изменением количества поступающего газа от источника и другие случаи, возникающие в реальных пневматических устройствах.

Для практики исследований газовой динамики наиболее важны частные случаи, в которых:

$$\alpha = 0, \quad \beta = 0, \quad G_n > 0;$$

$$\alpha > 0, \quad \beta = 0, \quad G_2 > 0;$$

$$\alpha > 0, \quad \beta = 0, \quad G_n > 0;$$

$$\alpha = 0, \quad \beta > 0, \quad G_3 > 0.$$

Таким образом, по физической модели процесса, протекающего в измерительной системе, при определенных допущениях с использованием уравнений газовой динамики (движения, неразрывности, сохранения энергии и состояния) получена математическая модель в виде двух линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

1.6.3. ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

При условиях $P_1(0) = P_{10}$, $T = \text{const}$, $G_n(0) = G_0$, $\alpha = 0$, $\beta = 0$ система (1.6.2) сводится к уравнению

$$V_1(t) \frac{dP_1(t)}{dt} + P_1(t) \frac{dV_1(t)}{dt} = RTG_n(t). \quad (1.6.3)$$

Общее решение уравнения (1.6.3) имеет следующий вид:

$$P_1(t) = \frac{RT}{V_1(t)} \int_0^t G_n(\tau) d\tau + P_{10} \frac{V_{10}}{V_1(t)}.$$

V_1, P_1, θ_1, T_1 V_i, P_i, θ_i, T_i

Рис. 1.6.2 Пневматическая глухая емкость с источником газовыделений

В этом случае источник газовыделений соединен с емкостью V_1 (рис. 1.6.2).

Из конструктивных соображений наиболее простым и информативным является следующий случай изменения объема емкости V_1 :

$$V_1(t) = V_{10} + bt, \quad b = \text{const}, \quad (b < 0, b = 0, b > 0).$$

Для некоторых химических процессов математическое описание изменения скорости газовыделений можно представить в кусочно-непрерывной форме:

$$G_{н1} = G_0;$$

$$G_{н2} = \begin{cases} G_0 \left(1 - \frac{t}{t_2}\right), & 0 \leq t < t_2, \\ 0, & t_2 \leq t; \end{cases}$$

$$G_{н3} = \begin{cases} G_0, & 0 \leq t < t_1, \\ G_0 \left(1 - \frac{t-t_1}{t_2-t_1}\right), & t_1 \leq t < t_2, \\ 0, & t_2 \leq t. \end{cases}$$

После подстановки этих выражений в общее решение получим конкретные функции изменения давления P_1 в первой емкости.

Условия $\beta = 0, \alpha > 0, V_1 = \text{const}, V_2 = \text{const}, T_1 = T_2 = T = \text{const}, G_n = 0, P_{10} > P_{20}$ справедливы для двух емкостей, соединенных ламинарным дросселем (рис. 1.6.3).

Система (1.6.2) в этом случае примет вид

$$\begin{cases} \tau_1 \frac{dP_1(t)}{dt} + P_1(t) = P_2(t), & \tau_1 = V_1 / (\alpha RT), \quad P_1(0) = P_{10}; \\ \tau_2 \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) = P_1(t), & \tau_2 = V_2 / (\alpha RT), \quad P_2(0) = P_{20}. \end{cases} \quad (1.6.4)$$

Рис. 1.6.3. Система пневматических глухих камер

Учитывая два факта, что при $t \rightarrow \infty$ давления $P_1(t)$ и $P_2(t)$ будут равны и количество газа в системе остается постоянным, можно записать:

$$P_1(\infty) = P_2(\infty) = P_{cp}; \quad P_{10}V_1 = \theta_{10}RT;$$

$$P_{cp}V_1 = \theta_1(\infty)RT; \quad P_{20}V_2 = \theta_{20}RT; \quad (1.6.5)$$

$$P_{cp}V_2 = \theta_2(\infty)RT; \quad \theta_1(\infty) + \theta_2(\infty) = \theta_{10} + \theta_{20}.$$

Из (1.6.4) и (1.6.5) получим $P_{cp} = \frac{\tau_1 P_{10} + \tau_2 P_{20}}{\tau_1 + \tau_2}$.

Тогда решение системы (1.6.4) найдем в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= P_{cp} + (P_{10} - P_{cp}) \exp\left[-\frac{t}{\tau_3}\right]; \\ P_2(t) &= P_{cp} - (P_{cp} - P_{20}) \exp\left[-\frac{t}{\tau_3}\right], \end{aligned} \quad (1.6.6)$$

где $\tau_3 = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$.

Найдем перепад давлений $\Delta P(t)$ на дросселе

$$\Delta P(t) = P_1(t) - P_2(t) = (P_{10} - P_{20}) \exp\left[-\frac{t}{\tau_3}\right].$$

Таким образом, емкость V_2 заполняется газом с переменным расходом.

Исследуем влияние отношения объемов емкостей V_1 и V_2 на характер изменения во времени давлений $P_1(t)$ и $P_2(t)$. С этой целью введем безразмерный параметр X :

$$X = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{V_1}{V_2},$$

позволяющий упростить анализ.

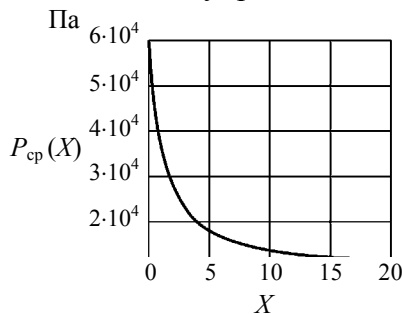


Рис. 1.6.4. Зависимость P_{cp} от X

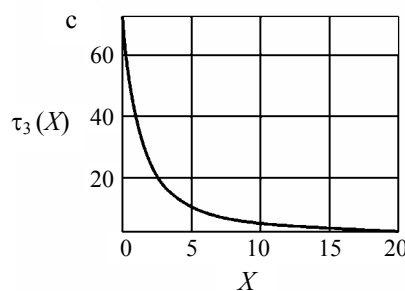


Рис. 1.6.5. Зависимость τ_3 от X

Перепишем величины V_{cp} и τ_3 с использованием параметра X :

$$P_{cp} = \frac{XP_{10} + P_{20}}{X+1}; \quad \tau_3 = \frac{\tau_1}{X+1}, \quad 0 < X < +\infty.$$

Графики изменения P_{cp} и τ_3 при $P_{10} = 1 \cdot 10^4$ Па, $P_{20} = 6 \cdot 10^4$ Па, $\tau = 70$ с в диапазоне $0 \leq X \leq 20$ приведены на рис. 1.6.4 и рис. 1.6.5.

Таким образом, при $X \rightarrow 0$, $P_{cp} \rightarrow P_{20}$ и $\tau_3 \rightarrow \tau_1$, а при $X \rightarrow +\infty$, $P_{cp} \rightarrow P_{10}$ и $\tau_3 \rightarrow 0$.

Запишем функции изменения давлений P_1 , P_2 и ΔP как функции двух переменных t и X :

$$P_1(t, X) = \frac{XP_{10} + P_{20}}{X+1} + \left(\frac{P_{10} - P_{20}}{X+1} \right) \exp \left[-\frac{t(X+1)}{\tau_1} \right];$$

$$P_2(t, X) = \frac{XP_{10} + P_{20}}{X+1} + (P_{10} - P_{20}) \frac{X}{X+1} \exp \left[-\frac{t(X+1)}{\tau_1} \right];$$

$$\Delta P(t, X) = P_1(t, X) - P_2(t, X) = (P_{10} - P_{20}) \exp \left[-\frac{t(X+1)}{\tau_1} \right].$$

Графики изменения давлений $P_1(t, X)$, $P_2(t, X)$ представлены на рис. 1.6.6.

Полученные уравнения (1.6.6) позволяют провести анализ соотношения времени разгрузки t_p емкости V_1 и времени заполнения t_3 емкости V_2 . Теоретически давления в емкостях V_1 и V_2 уравниваются при $t \rightarrow \infty$. Найдем время t_p , при котором давление в емкости V_1 достигнет значения $P_{cp} + \Delta P$ и t_3 , при котором давление в емкости V_2 достигнет значения $P_{cp} - \Delta P$:

$$\begin{aligned} P_1(t_p) &= P_{cp} + \Delta P = P_{cp} + (P_{10} - P_{cp}) \exp \left[-\frac{t_p}{\tau_3} \right]; \\ P_2(t_3) &= P_{cp} - \Delta P = P_{cp} - (P_{cp} - P_{20}) \exp \left[-\frac{t_3}{\tau_3} \right]. \end{aligned} \quad (1.6.7)$$

Из (1.6.7) определим t_p и t_3 :

$$t_p = \tau_3 \ln(P_{10} - P_{cp}) / \Delta P = \frac{\tau_1}{X+1} \ln \frac{K}{X+1};$$

$$t_3 = \tau_3 \ln(P_{cp} - P_{20}) / \Delta P = \frac{\tau_1}{X+1} \ln \frac{KX}{X+1},$$

где $K = \frac{P_{10} - P_{20}}{\Delta P}$.

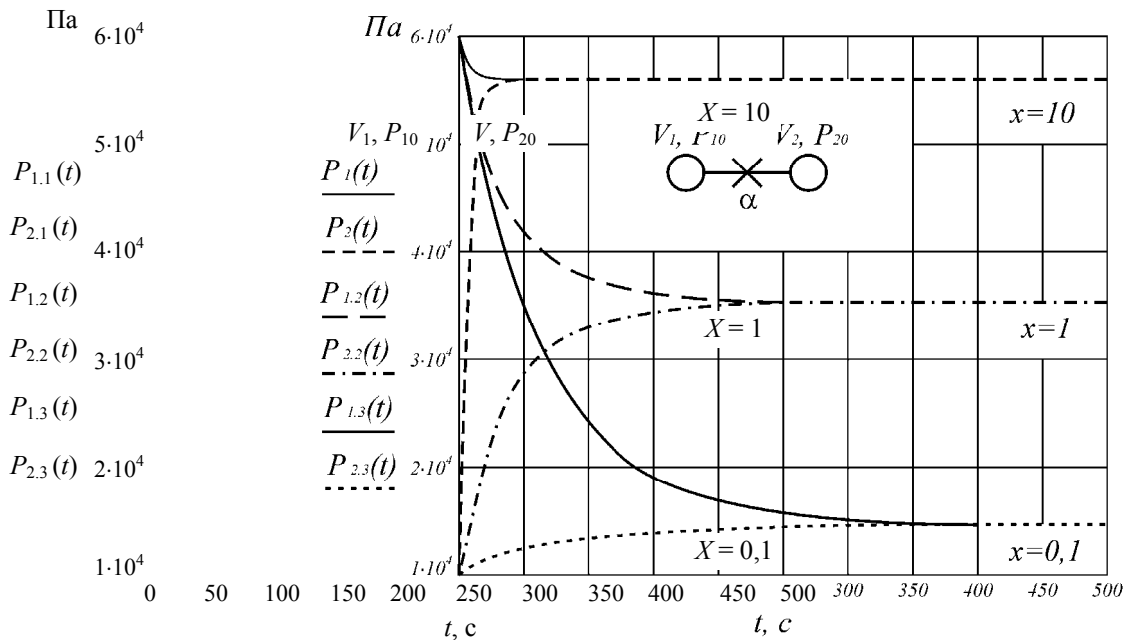


Рис. 1.6.6. Зависимости изменения давления в системе емкостей, соединенных дросселем

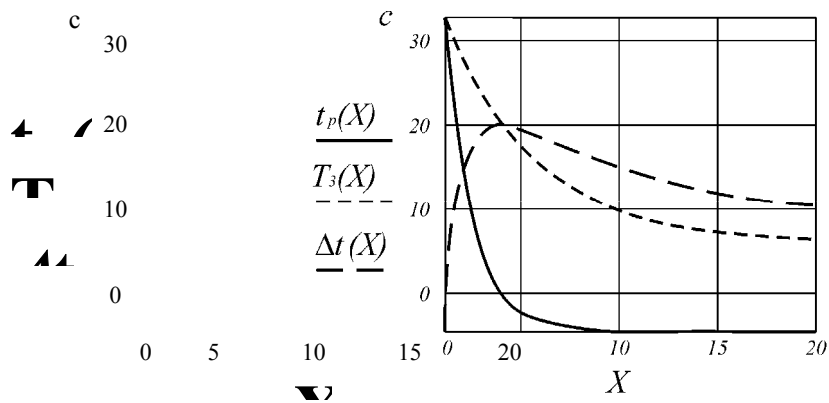


Рис. 1.6.7. Зависимость t_p , t_3 , Δt от параметра X

Найдем разность Δt :

$$\Delta t = t_3 - t_p = \frac{\tau_1}{X+1} \ln X.$$

Построим зависимость t_p , t_3 , Δt от параметра X (рис. 1.6.7).

При условиях $\beta = 0$, $\alpha > 0$, $V_1 = \text{const}$, $V_2 = \text{const}$, $T_1 = T_2 = T = \text{const}$, $G_{II} = G_0$ будем иметь систему пневматических емкостей с источником газовыделений (рис. 1.6.8).

Система (1.6.2) примет вид:

$$\begin{cases} \tau_1 \frac{dP_1(t)}{dt} + P_1(t) = P_2(t) + \frac{G_0}{\alpha}, & P_1(0) = P_{10}; \\ \tau_2 \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) = P_1(t), & P_2(0) = P_{20}. \end{cases} \quad (1.6.8)$$

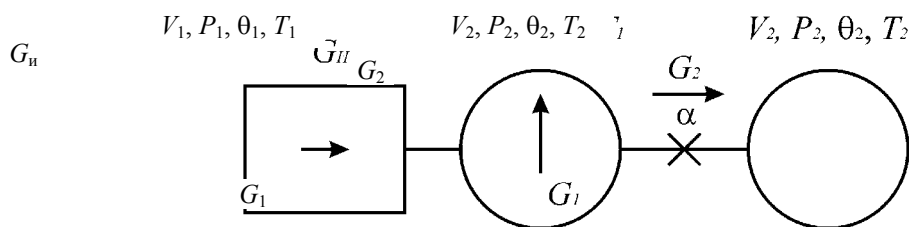


Рис. 1.6.8. Система пневматических камер с источником газовыделений

Решение (1.6.8) запишем в следующем виде:

$$P_1(t) = P_{cp} + \frac{G_0 \tau_2^2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} + \left(P_{10} - \frac{G_0 \tau_2^2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} - P_{cp} \right) \exp\left[-\frac{t}{\tau_3}\right] + \frac{G_0}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)} t;$$

$$P_2(t) = P_{cp} - \frac{G_0 \tau_1 \tau_2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} + \left(P_{cp} - \frac{G_0 \tau_1 \tau_2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} - P_{20} \right) \exp\left[-\frac{t}{\tau_3}\right] + \frac{G_0}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)} t.$$

Определим перепад давления $\Delta P(t)$ на дросселе:

$$\Delta P(t) = P_1(t) - P_2(t) = \left(P_{10} - P_{20} - \frac{G_0 \tau_2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)} \right) \exp \left[-\frac{t}{\tau_3} \right] + \frac{G_0 \tau_2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)}. \quad (1.6.9)$$

Характер изменения $P_1(t)$, $P_2(t)$ и $\Delta P(t)$ приведены на рис. 1.6.9.

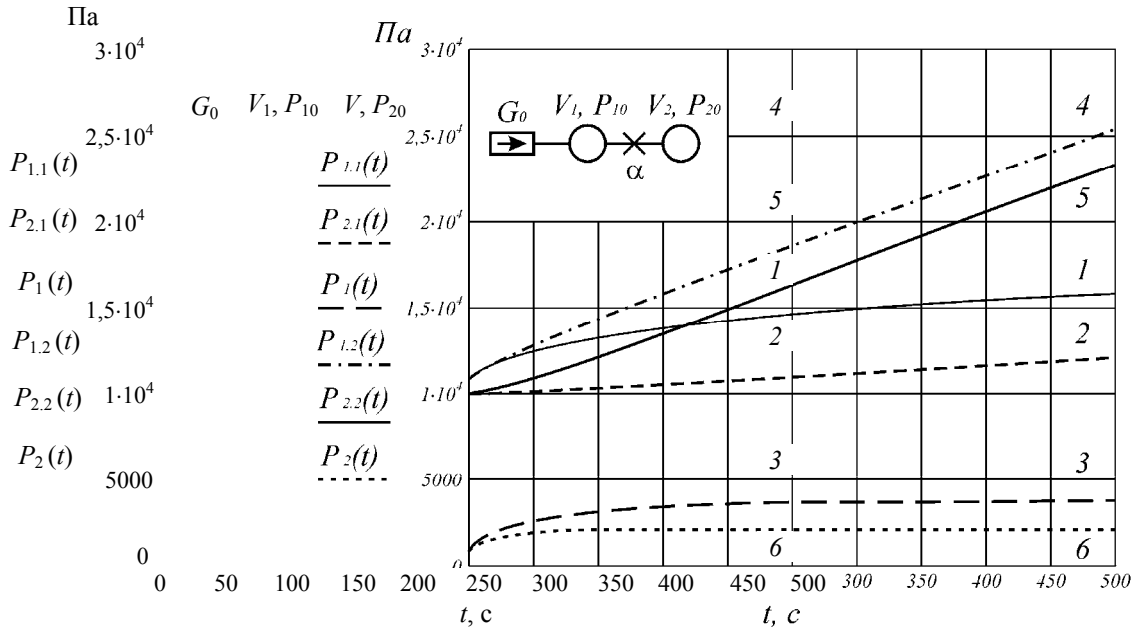


Рис. 1.6.9. Зависимости изменения давления в измерительной емкости от источника для кривых 1, 2, 3 параметр $X = 0,1$; для кривых 4, 5, 6 параметр $X = 1$

В выражении для $\Delta P(t)$ (1.6.9) с течением времени первое слагаемое уменьшится и, начиная с некоторого t^* , с заранее заданной погрешностью δ %, величина $\Delta P(t)$ в основном определяется вторым слагаемым. Поэтому с погрешностью менее δ % справедливо равенство

$$\Delta P(t) = \frac{G_0 \tau_2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)} \quad \text{при } t > t^*,$$

где $t^* = \tau_3 \ln \left[\frac{100}{\delta} \left(\frac{\alpha(P_{10} - P_{20}) \tau_1 + \tau_2}{G_0 \tau_2} \right) - 1 \right]$.

При условиях $\alpha > 0$, $V_1 = \text{const}$, $V_2 = \text{const}$, $T = \text{const}$ систему (1.6.2) запишем:

$$\begin{cases} \tau_1 \frac{dP_1(t)}{dt} + P_1(t) = P_2(t) + \frac{G_n(t)}{\alpha}, & G_n(0) = G_0; \\ \tau_2 \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) = P_1(t), & P_1(0) = P_{10}, P_2(0) = P_{20}. \end{cases} \quad (1.6.10)$$

Решением системы (1.6.10) является:

$$P_1(t) = P_{\text{cp}} + \frac{G_n(t) \tau_2^2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} + \left(P_{\text{cp}} - \frac{G_n(t) \tau_2^2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} - P_{\text{cp}} \right) \times \exp \left[-\frac{t}{\tau_3} \right] + \frac{1}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)} \int_0^t G_n(\tau) d\tau;$$

$$P_2(t) = P_{cp} - \frac{G_n(t)\tau_1\tau_2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} - \left(P_{cp} - \frac{G_n(t)\tau_1\tau_2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} - P_{20} \right) \times \\ \times \exp \left[-\frac{t}{\tau_3} \right] + \frac{1}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)} \int_0^t G_n(t) d\tau.$$

При условиях $\alpha > 0$, $V_1 = \text{const}$, $V_2 = \text{const}$, $T = \text{const}$, $V_2(t)$, $G_n(t)$ (1.6.2) будет иметь вид:

$$\begin{cases} V_1(t) \frac{dP_1(t)}{dt} + \alpha RTP_1(t) = \alpha TRP_2(t) + RTG_n(t); \\ V_2(t) \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) \left(\frac{dV_2(t)}{dt} + \alpha RT \right) = \alpha RTP_1(t). \end{cases}$$

Эта система в квадратурах в общем виде не разрешима [7].

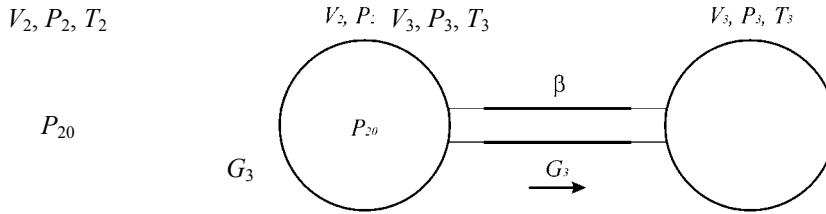


Рис. 1.6.10. Процесс разгрузки емкости V_2

Рассмотрим процесс разгрузки емкости 2, в которой в начальный момент времени накоплено количество газа θ с давлением P_{20} . Отключение емкости V_2 от V_1 и подключение ее к емкости V_3 приводит к изменению давления P_2 (рис. 1.6.10).

Процесс изотермического истечения газа из емкости V_2 в изобарную емкость V_3 описывается следующими уравнениями:

$$P_2(t)V_2 = \theta(t)RT; \quad G_3 = \beta(P_2(t) - P_3); \\ G_3 = -\frac{d\theta(t)}{dt}; \quad P_3 = \text{const}; \quad P_2(0) = P_{20} > P_2(\infty) = P_3.$$

Тогда получим линейное дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\tau_4 \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) = P_3; \quad P_2(0) = P_{20} > P_2(\infty) = P_3; \quad \tau_4 = V_2/(\beta RT). \quad (1.6.11)$$

Решение уравнения (1.6.11) запишем в виде

$$P_2(t) = (P_{20} - P_3) \exp \left[-\frac{t}{\tau_4} \right] + P_3. \quad (1.6.12)$$

Найдем время t_p изменения $P_2(t)$ от величины P_{20} до величины P_a . Из выражения (1.6.12) находим t_p

$$t_p = \tau_4 \ln \frac{P_{20} - P_3}{P_a - P_3}.$$

Результаты анализа математической модели сведены в табл. 1.6.1.

Для выполнения допущений, используемых при выводе математической модели, предполагалось, что течение газа через дроссель ламинарное. Режим течения жидкости характеризуется числом Рейнольдса Re . Когда значение Re меньше критического числа $Re_{кр}$, имеет место ламинарное течение газа или жидкости.

При течении газа в круглых трубах, характерной скоростью считается средняя по сечению скорость, а характерным размером – диаметр трубы. Для этого случая $Re_{кр} = 1400$:

$$Re = \frac{Vd\rho}{\eta}, \quad (1.6.13)$$

где V – средняя скорость по сечению, м/с; d – диаметр капилляра, м; ρ – плотность газа, кг/м³; η – динамическая вязкость газа, Н·с/м².

Максимальную величину средней скорости оценим, используя расход через капилляр, определяемый по формуле Пуазейля:

$$G = \frac{\pi d^4 \Delta P \rho}{128 \eta l}. \quad (1.6.14)$$

Учитывая среднюю скорость потока газа, расход определяется следующим образом:

$$G = \frac{\pi d^2}{4} \rho V. \quad (1.6.15)$$

Приравняв правые части выражений (1.6.14) и (1.6.15), получим

$$V = \frac{d^2 \Delta P}{32 \eta l}.$$

Подставив это выражение в (1.6.13), получим

$$Re = \frac{d^3 \Delta P \rho}{32 \eta^2 l} < Re_{кр}.$$

Таким образом, геометрические размеры капилляра должны удовлетворять следующему соотношению:

$$\frac{d^3}{l} < 32 Re_{кр} \frac{\eta^2}{\rho \Delta P}.$$

В этом случае заведомо можно утверждать, что течение газа через дроссель, выполненный в виде цилиндрической трубы, ламинарное.

Если в системе уже используется дроссель с определенными значениями диаметра и длины, то накладываются ограничения на перепад давления

$$\Delta P < 32 Re_{кр} \frac{\eta^2 l}{\rho d^3}.$$

При выполнении этого условия режим течения через дроссель будет носить ламинарный характер.

Определим влияние параметров α и X на процесс измерения. Величина проводимости дросселя α при постоянном перепаде давления ΔP на дросселе и объеме V_2 определяет время накопления заданной дозы газа в измерительной емкости, причем наблюдается обратно пропорциональная зависимость. В том случае, когда время заполнения емкости V_2 сопоставимо со временем формирования импульсов P_i , управляющих работой клапанов на линиях заполнения и разгрузки, в измерительной емкости будет успевать накапливаться доза газа, значительно отличающаяся от номинальной, т.е. будет вноситься большая погрешность в результат измерения.

Поэтому величину проводимости дросселя α выбирают так, чтобы согласовать динамические характеристики измерительной и управляющей систем. При этом переходные процессы в управляющей системе должны протекать значительно быстрее, чем время заполнения и разгрузки измерительной емкости.

Если величина накопительной емкости V_1 значительно больше объема измерительной емкости V_2 ($X \gg 1$), то выделение небольшого количества газа от маломощного источника не приведет к существ-

венному изменению давления P_2 в измерительной емкости. Измерительное устройство будет иметь малую чувствительность.

При уменьшении величины V_1 ($X \rightarrow 0$) не будет происходить сам процесс накопления газа от источника. Для создания именно такого процесса в измерительной системе, который заложен в созданной физической модели и описан в исследуемой математической модели, необходим одинаковый порядок величин V_1 и V_2 ($X \leq 1$).

Таким образом, решение в квадратурах полученной системы дифференциальных уравнений в общем случае найти не удастся. Проведен анализ частных случаев математической модели, наиболее важных для практики исследований газовыделений и описывающих шлюзование газовых потоков.

1.6.4. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

После составления и анализа модели процесса необходимо определить соответствие полученного математического описания реальному процессу, происходящему в измерительной системе.

Адекватность математической модели процессу, протекающему в измерительной системе, проверялась экспериментально на созданной установке (рис. 1.6.11). От компрессора 2 воздух поступает в ресивер 3. Далее воздух очищается от масла, влаги и пыли с помощью маслоотделителя 4 и воздушного фильтра 5.

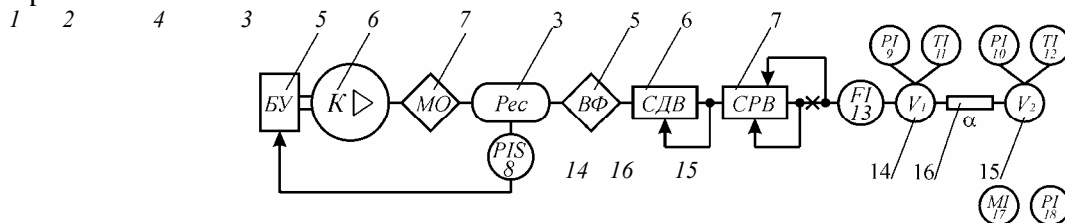


Рис. 1.6.11. Схема экспериментальной установки для исследования процесса, протекающего в измерительной системе:

- 1 – блок управления; 2 – компрессор; 3 – ресивер; 4 – маслоотделитель;
- 5 – воздушный фильтр; 6 – стабилизатор давления воздуха;
- 7 – стабилизатор расхода воздуха; 8 – электроконтактный манометр;
- 9, 10 – образцовые манометры; 11, 12 – термометры; 13 – газовый счетчик;
- 14, 15 – емкости; 16 – ламинарный дроссель; 17 – психрометр; 18 – барометр

Для получения стабильного расхода воздуха использовались два контура стабилизации давления и контур стабилизации расхода. Первый контур (блок управления 1 и электроконтактный манометр 8) обеспечивает поддержание давления в ресивере 3 в диапазоне 0,19...0,20 МПа. Второй контур построен на мембранном стабилизаторе давления 6, который обеспечивает стабилизированное давление в диапазоне 0,02...0,15 МПа с погрешностью 1 %.

Мембранный стабилизатор расхода 7 обеспечивает поддержание расхода в диапазоне $(0,2...2,4) \cdot 10^{-5}$ кг/с с погрешностью 1 %. Газовый счетчик 13 (газосчетчик барабанный типа ГСБ-400 с жидкостным затвором) измеряет количество газа, пропущенного через него, с погрешностью 1 %.

В емкостях 14 и 15 измеряют давление манометрами 9 и 10 и температуру термометрами 11 и 12. Используются образцовые манометры, имеющие шкалу 0...0,1 МПа и класс точности 0,15 (тип МО-250-1227-1), термометры лабораторные ртутные со шкалой 0...55 °С с ценой деления 0,1 °С (тип ТЛ-4 № 2).

Психрометр 17 измеряет влажность и температуру окружающего воздуха. Используется психрометр аспирационный типа МЗ4 со шкалой от 10 до 100 % влажности и шкалой от -30 до +50 °С, с ценой деления 0,2 °С.

Барометр 18 измеряет атмосферное давление. Используется барометр-анероид мембранный типа БАММ-1 со шкалой 600...800 мм рт. ст. (79...106 кПа) с ценой деления 1 кПа.

В качестве ламинарных дросселей 16 использовались металлические капилляры с внутренним диаметром $0,18 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $(20, 40, 60, 80$ и $100) \cdot 10^{-3}$ м.

Эксперимент осуществлялся следующим образом. В емкости 14 и 15 накачивался воздух до давления, соответственно, 0,06 и 0,01 МПа. Далее емкости 14 и 15 соединялись через дроссель 16 и измерялось изменение давления в емкостях во времени.

Проверка адекватности математической модели процессу, протекающему в измерительной системе, осуществлялась путем сравнения результатов, полученных по математической модели, с результатами, полученными в ходе эксперимента.

По экспериментальным данным необходимо определить разности ΔP_p между расчетными значениями давлений $P_{1,2}(t)$ и $P_{2,2}(t)$, полученных по математической модели, и ΔP_3 давлений $P_{1,2}^3(t)$ и $P_{2,2}^3(t)$, полученных экспериментально, т.е.:

$$\Delta P_p(t) = P_{1,2}(t) - P_{2,2}(t);$$

$$\Delta P_3(t) = P_{1,2}^3(t) - P_{2,2}^3(t).$$

После определения математического ожидания

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(i),$$

где $y(i)$ – экспериментальные данные; N – количество измерений, и дисперсии

$$D_y = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (y(i) - M)^2,$$

находится число: $S = \sum_{i=1}^N (y(i) - y_p(i))^2$,

где $y_p(i)$ – данные, рассчитанные по модели.

Используя полученные значения D_y и S , определяют расчетное значение квантиля F – распределения Фишера

$$F = \frac{D_y(N-2)}{S}.$$

По таблицам для соответствующих значений степеней свободы $I = N - 2$ находят F_T – табличное значение квантиля распределения Фишера [7].

В рассматриваемом случае получили следующие значения $N = 7$, $I = 5$, $F_T = 5,05$. Среди всех вычисляемых значений F максимальное значение равно единице, т.е. $F = 1$.

Данные экспериментального исследования и расчета приведены в табл. 1.6.2.

1.6.2. Результаты обработки экспериментальных данных по проверке адекватности математической модели

t, c	ΔP_p	ΔP_3	M	D	S	F
	$10^3, Pa$			$10^6, Pa^2$		
0	50,0	51,9; 52,4; 53,8; 51,5; 53,1; 52,8; 52,3	52,5	0,710	48,80	0,07
10	37,9	38,9; 39,2; 38,5; 39,0; 40,3; 39,3; 39,4	39,0	0,450	14,20	0,16
20	28,7	27,0; 25,9; 26,8; 28,1; 27,5; 27,8; 26,7	27,1	0,670	20,90	0,16
30	21,7	23,0; 23,3; 22,9; 24,4; 23,8; 24,0; 23,6	23,6	0,360	26,30	0,07
40	16,5	14,2; 14,6; 15,8; 15,3; 16,1; 15,8; 14,3	15,2	0,740	16,30	0,23
50	12,5	13,0; 12,5; 14,6; 13,5; 14,0; 13,8; 14,3	13,7	0,650	12,80	0,25

60	9,4	8,4; 7,8; 8,0; 9,2; 7,5; 9,5; 8,8	8,5	0,670	9,50	0,35
70	7,2	7,2; 5,9; 6,1; 6,4; 7,0; 6,5; 5,7	6,4	0,370	6,30	0,29
80	5,4	5,3; 4,9; 5,5; 6,1; 6,4; 6,7; 5,8	5,8	0,480	3,60	0,67
90	4,1	4,4; 4,0; 3,3; 3,8; 4,1; 3,5; 3,7	3,8	0,170	1,40	0,61
100	3,1	3,0; 2,8; 3,4; 3,7; 2,6; 3,5; 3,1	3,2	0,190	1,00	0,95
110	2,4	2,1; 1,8; 2,0; 2,3; 2,1; 2,2; 2,2	2,1	0,030	0,80	0,19
120	1,8	1,8; 1,5; 1,4; 1,5; 1,6; 1,6; 1,7	1,6	0,020	0,40	0,25
130	1,4	1,4; 1,3; 1,2; 1,5; 1,4; 1,2; 1,3	1,3	0,016	0,11	0,73
140	1,0	0,8; 0,7; 0,9; 0,9; 0,8; 1,0; 1,0	0,9	0,020	0,20	0,50
150	0,8	0,7; 0,9; 0,8; 0,7; 0,8; 0,9; 0,7	0,8	0,010	0,05	1,00
160	0,6	0,6; 0,7; 0,6; 0,8; 0,7; 0,6; 0,8	0,7	0,010	0,10	0,50
170	0,4	0,4; 0,5; 0,5; 0,5; 0,6; 0,6; 0,5	0,5	0,006	0,12	0,25
180	0,3	0,2; 0,3; 0,3; 0,4; 0,2; 0,3; 0,3	0,3	0,006	0,03	1,00
190	0,3	0,2; 0,1; 0,2; 0,2; 0,1; 0,3; 0,2	0,2	0,006	0,12	0,25
200	0,2	0,2; 0,2; 0,1; 0,2; 0,1; 0,2; 0,2	0,2	0,004	0,02	1,00
210	0,1	0,1; 0,2; 0,1; 0,2; 0,2; 0,1; 0,2	0,2	0,006	0,04	0,75
220	0,1	0,1; 0,2; 0,1; 0,1; 0,2; 0,2; 0,1	0,1	0,006	0,03	1,00
230	0,1	0,1; 0,2; 0,1; 0,2; 0,1; 0,1; 0,1	0,1	0,004	0,02	1,00
240	0,0	0,1; 0,1; 0,1; 0,0; 0,1; 0,1; 0,1	0,1	0,002	0,06	0,17
250	0,0	0,0; 0,1; 0,0; 0,0; 0,1; 0,0; 0,0	0,0	0,004	0,02	1,00

Исследуемая математическая модель адекватна, так как $F < F_T$.

Таким образом, адекватность математической модели проверялась сравнением квантиля распределения Фишера, рассчитанного по экспериментальным данным, с квантилем, найденным по таблице. Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о том, что расчетные математические зависимости адекватны процессам, протекающим в измерительной системе.

1.7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

1. Какова размерность величин, входящих в формулу Пуазейля?
2. Как экспериментально определить проводимость дросселя?
3. Как определить точность экспериментального измерения проводимости дросселя?
4. Каков физический смысл газовой постоянной?

5. Каково влияние физико-химических свойств газа и его температуры на величину проводимости дросселя?
6. Приведите схему дроссельного сумматора. Почему это устройство получило такое название?
7. С какой целью используется потенциальный выход?
8. Как формируется потенциальный выход?
9. Изменение какого параметра наиболее существенным образом влияет на точность экспериментального измерения проводимости дросселя?
10. В виде каких зависимостей учитывается наличие потенциального выхода устройства при составлении математического описания процессов, происходящих в элементах устройства.
11. Какие законы используются при выводе уравнения Пуазейля?
12. При каких условиях процессы, протекающие в ламинарном дросселе, описываются уравнением Пуазейля?
13. Как формулируется закон Ома для ламинарного дросселя?
14. Какими уравнениями описывается течение газа через дроссель и по пневмокамере?
15. Каким уравнением описывается состояние газа в емкости?
16. Какие допущения используются при выводе дифференциального уравнения, описывающего процессы, протекающие в пневмокамере?
17. Какие Вы знаете законы, описывающие состояние газа в емкости?
18. Как определить время, за которое выходной сигнал пневмокамеры достигнет значения $KP_0 - \Delta P$ при подаче на вход сигнала $P_0 \cdot 1(t)$?
19. Как определить значение выходного сигнала устройства в установившемся режиме, используя передаточную функцию, зная входной сигнал?
20. Как определить значения выходного сигнала устройства в установившемся режиме, используя дифференциальное уравнение, описывающее это устройство, при известном входном сигнале?
21. От каких параметров устройства зависит время переходного режима?
22. Какие Вы знаете способы уменьшения времени переходного процесса в устройстве?
23. Как доказывается теорема о конечных значениях, используемая в преобразовании Лапласа?
24. Чем определяется порядок дифференциального уравнения, описывающего процессы, протекающие в устройстве?
25. Каковы особенности определения передаточной функции устройства, имеющего несколько входов?
26. Как экспериментально определить переходную функцию устройства?
27. Как теоретически определить переходную функцию устройства?
28. В чем различие расходных характеристик турбулентного и ламинарного дросселей?
29. Как оценивается погрешность косвенных измерений?
30. Какие допущения используются при составлении математической модели процесса заполнения пневмокамеры, подключенной к источнику расхода газа?
31. Как проверяется адекватность математической модели?

1.8. ТЕСТ ПО МАТЕРИАЛАМ ПЕРВОЙ ГЛАВЫ

Из предложенных вариантов ответов на задание необходимо выбрать один правильный.

1. Что является элементами пневматики?
 - а) пневмосопротивления;
 - б) пневмоемкости;
 - в) пневмокамеры;
 - г) пневмосопротивления, пневмоемкости, пневмокамеры.
2. Причиной движения газа через дроссель является ...
 - а) мощность потока;
 - б) разность давлений;
 - в) напор;
 - г) разность давлений до и после дросселя.
3. Закон Бойля-Мариотта записывается следующим образом:

- а) $PV = \frac{M}{\mu}RT$;
- б) $PV = NkT$;
- в) $P_1V_1 = P_2V_2$, $M = \text{const}$;
- г) $V = V_0(1 + \alpha t)$.

4. Закон Гей-Люссака записывается следующим образом:

- а) $P_1V_1 = P_2V_2$;
- б) $V = V_0(1 + \alpha t)$, $P = \text{const}$, $M = \text{const}$;
- в) $PV = \text{const}$;
- г) $P = P_0(1 + \alpha t)$.

5. Закон Шарля записывается следующим образом:

- а) $P = P_0(1 + \alpha t)$, $V = \text{const}$, $M = \text{const}$;
- б) $PV = \frac{M}{\mu}RT$;
- в) $\frac{V}{T} = \text{const}$, $M = \text{const}$;
- г) $PV^\gamma = \text{const}$.

6. Состояние газа, находящегося в равновесии, определяется ...

- а) температурой, давлением, молярной массой;
- б) температурой, давлением, объемом;
- в) температурой, объемом, числом частиц газа;
- г) температурой, давлением, временем.

7. Критерий Рейнольдса записывается в следующем виде:

- а) $\frac{G\theta k}{\mu}$;
- б) $\frac{PV\rho}{\eta}$;
- в) $\frac{GV\rho}{\mu}$;
- г) $\frac{Vd\rho}{\eta}$.

8. Проводимость ламинарного дросселя зависит от ...

- а) $f(d, \rho, \mu, l)$;
- б) $f(d, \rho, \mu, G)$;
- в) $f(d, \rho, \eta, l)$;
- г) $f(d, \mu, \rho, l)$.

9. Средняя плотность газа, находящегося в дросселе, зависит от ...

- а) $f(P_1, P_2, R, T)$;
- б) $f(P_1, P_2, \eta, T)$;
- в) $f(P_1, P_2, \mu, T)$;

г) $f(P_1, P_2, c, T)$.

10. Дроссельный сумматор, нагруженный на емкость, описывается дифференциальным уравнением ...
- а) первого порядка;
 - б) второго порядка;
 - в) третьего порядка;
 - г) четвертого порядка.
11. Пневмокамера описывается дифференциальным уравнением ...
- а) первого порядка;
 - б) второго порядка;
 - в) третьего порядка;
 - г) четвертого порядка.
12. Расходная характеристика пневмосопротивления определяет зависимость ...
- а) расхода газа от перепада давления на сопротивлении;
 - б) массового расхода газа от перепада давления на сопротивлении;
 - в) расхода газа от давления до сопротивления;
 - г) расхода газа от давления после сопротивления.
13. Причиной движения газа через дроссель является ...
- а) разность давлений до и после дросселя;
 - б) давление до дросселя;
 - в) разность давлений после и до дросселя;
 - г) сумма давлений до и после дросселя.
14. Если дроссель выполнен в виде канала цилиндрической формы с малым отношением длины к диаметру, то это ...
- а) ламинарный дроссель;
 - б) дроссель смешанного типа;
 - в) турбулентный дроссель;
 - г) нельзя определить тип.
15. Если дроссель выполнен в виде канала цилиндрической формы с большим отношением длины к диаметру, то это ...
- а) ламинарный дроссель;
 - б) дроссель смешанного типа;
 - в) турбулентный дроссель;
 - г) нельзя определить тип.
16. Если накопление газа в элементе осуществляется за счет изменения объема, то это ...
- а) пневмокамера;
 - б) емкость;
 - в) дроссель;
 - г) пневмоконденсатор.
17. Если накопление газа в элементе при постоянном объеме приводит к увеличению давления, то это ...
- а) пневмокамера;
 - б) емкость;

- в) дроссель;
- г) пневмоконденсатор.

18. Формула Пуазейля записывается следующим образом:

- а) $G = \alpha_p \varepsilon F \sqrt{2\rho_1(P_1 - P_2)}$;
- б) $G = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)d}{RT\lambda l}}$;
- в) $G_1 + G_2 + G_3 = G_{\text{вых}}$;
- г) $G = \frac{\pi d^4 (P_1^2 - P_2^2)}{128\eta l}$.

19. Процессы, происходящие в устройстве, содержащем два последовательно соединенных независимых накопителя воздуха, описываются дифференциальным уравнением ...

- а) первого порядка;
- б) второго порядка;
- в) третьего порядка;
- г) четвертого порядка.

20. Первое правило Кирхгофа для пневматической цепи записывается следующим образом:

- а) $G = \alpha_p \varepsilon F \sqrt{2\rho_1(P_1 - P_2)}$;
- б) $G = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)d}{RT\lambda l}}$;
- в) $G_1 + G_2 + G_3 = G_{\text{вых}}$;
- г) $G = \frac{\pi d^4 (P_1^2 - P_2^2)}{128\eta l}$.

21. Закон Ома для пневматической цепи записывается следующим образом:

- а) $V = V_0(1 + \alpha t)$;
- б) $\theta = \frac{dG}{dt}$;
- в) $\text{Re} = \frac{Vd\rho}{\eta}$;
- г) $G = \alpha(P_1 + P_2)$.

22. Устройство (рис. 1.5.8) реализует колебательное звено при условии (табл. 1.5.1) ...

- а) $a_1^2 - 4a_2a_0 > 0$;
- б) $a_1^2 - 4a_2a_0 = 0$;
- в) $a_1^2 - 4a_2a_0 < 0$;
- г) ни при каком.

2. АНАЛИЗ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В данной главе изучаются усилительные звенья, построенные на мембранных элементах. Технические характеристики комплекса элементов универсальной системы элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА) приведены в прил. 4. Рассмотрено преобразование информации, происходящее в пятимембранном элементе сравнения. Формируются навыки студентов по составлению и анализу структурных схем аналоговых пневматических устройств, в том числе по выявлению обратных связей в схемах.

2.1. ЭЛЕМЕНТ СРАВНЕНИЯ – ОСНОВА ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

В системе УСЭППА имеются трех- и пятимембранные элементы сравнения (рис. 2.1.1), которые содержат мембранный блок и два дросселя типа "сопло-заслонка" [1]. Между мембранами образуются отдельные камеры.

Мембранный блок перемещается как единое целое и управляет дросселями. В крайних камерах А и Е, А и Г имеется два входа, причем один вход соединен непосредственно, а второй вход – через дроссель типа "сопло-заслонка" с камерой. В остальные камеры входные сигналы поступают непосредственно.

Выходной сигнал элемента формируется следующим образом. Давление питания подается в верхнее сопло элемента, а атмосферное – в нижнее сопло. Крайние камеры соединяются друг с другом. Давления в камерах создают силы, которые складываются на мембранном блоке.

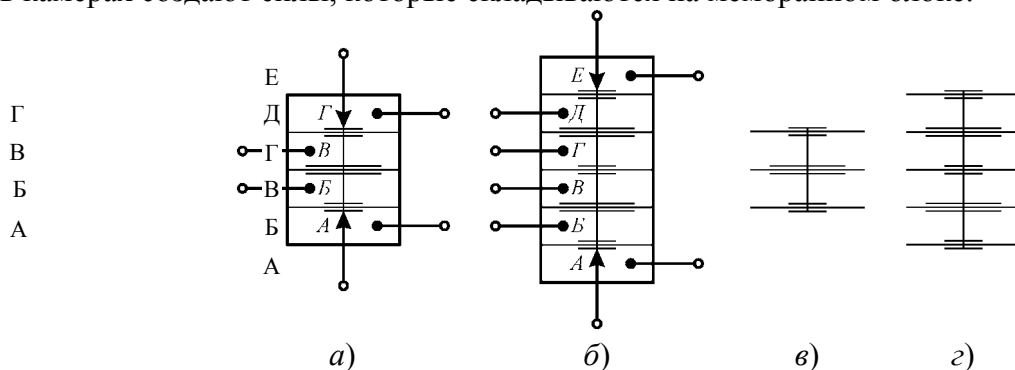


Рис. 2.1.1. Трехмембранный (а) и пятимембранный (б) элементы сравнения и их мембранные блоки (в) и (г)

В качестве положительного направления выберем направление сверху вниз. Запишем уравнение равновесия пятимембранного блока:

$$+P_E f + P_D(F - f) - P_\Gamma(F - f) + P_B(F - f) - P_B(F - f) - P_A f = 0, \quad (2.1.1)$$

где $P_A, P_B, P_B, P_\Gamma, P_D, P_E$ – давления в соответствующих камерах; f, F – эффективные площади малых и больших мембран соответственно.

Давления в крайних камерах равны между собой, так как эти камеры соединены друг с другом. Особенность конструкции элемента в том, что площади малых мембран в крайних камерах равны. Поэтому в уравнении (2.1.1) члены $P_A f$ и $P_E f$ равны и сокращаются. Тогда уравнение равновесия мембранного блока запишется как алгебраическая сумма давлений во входных камерах Д, Г, В и Б:

$$+P_D - P_\Gamma + P_B - P_B = 0.$$

Изучим работу пятимембранного элемента сравнения (рис. 2.1.2).

Соединим крайние камеры, в одно сопло подадим питание, а второе сопло соединим с атмосферой. Входное давление подадим в одну из входных камер. Остальные три входные камеры соединим с атмосферой.

Подадим на вход давление $P_1 = 1$ кПа. Это давление в камере Д на эффективных площадях мембран создает результирующую силу, которая перемещает мембранный блок элемента вниз. Проводимость сопла в камере А уменьшается, а в камере Е – увеличивается. Поэтому давление на выходе увеличивается.

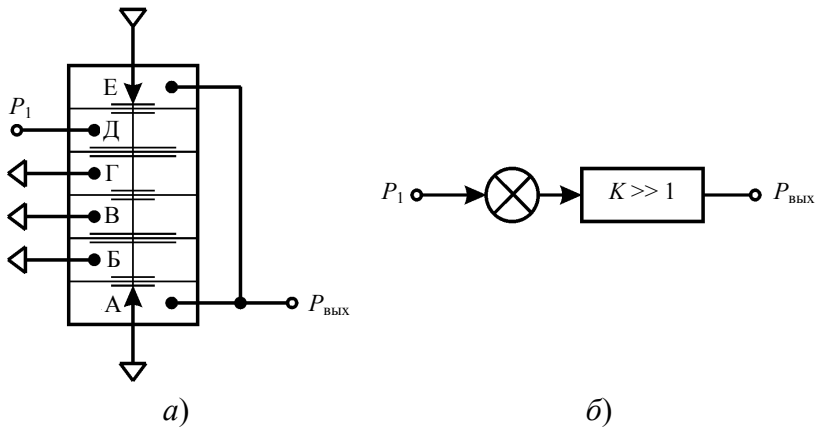


Рис. 2.1.2. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы элемента сравнения

Давление $P_{\text{вых}}$ действует в камерах А и Е на эффективных площадях мембран f и создают две силы равные по величине и противоположные по направлению. Результирующая сила от давления $P_{\text{вых}}$ равна нулю, т.е. выходное давление не влияет на мембранный блок. Можно констатировать, что в данной схеме нет обратной связи. Поэтому мембранный блок продолжает свое движение и полностью перекрывает сопло в камере А и полностью открывает сопло в камере Е. На выходе элемента давление будет равно давлению питания $P_{\text{вых}} = P_{\text{пит}} = 140$ кПа.

Таким образом, пятимембранный элемент сравнения можно представить как последовательно соединенный сумматор и усилительное звено с большим коэффициентом усиления.

Подадим давления P_1, P_2, P_3 и P_4 во входные камеры Д, Г, В и Б пятимембранного элемента сравнения (рис. 2.1.3).

Давления P_1 и P_3 создают силу N_1 , которая стремится переместить мембранный блок вниз, а давления P_2 и P_4 создают силу N_2 , которая стремится переместить мембранный блок вверх. Если результирующая сила $\Delta N = N_1 - N_2$ больше нуля, то мембранный блок перемещается вниз и наоборот. В первом случае выходной сигнал будет равен давлению питания ($P_{\text{вых}} = P_{\text{пит}}$), а во втором случае – атмосферному ($P_{\text{вых}} = P_{\text{атм}}$). Для упрощения записи вместо давления питания можно записать единицу, а вместо атмосферного давления – ноль.

Выходной сигнал устройства описывается формулой

$$P_{\text{вых}} = \begin{cases} 1, & P_1 + P_3 > P_2 + P_4; \\ 0, & P_1 + P_3 < P_2 + P_4. \end{cases}$$

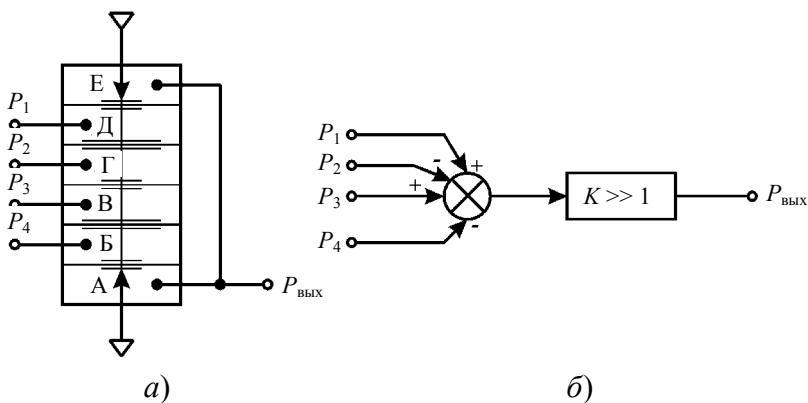


Рис. 2.1.3. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы устройства

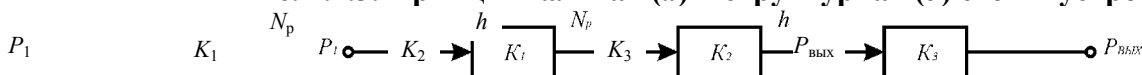


Рис. 2.1.4. Схема преобразования информации в элементе сравнения

Изучим, как распространяется информация в пятимембранном элементе сравнения. Схема преобразования информации в элементе сравнения показана на рис. 2.1.4. Выходные давления подаются во

входные камеры Д, Г, В и Б. Каждая камера элемента отделена резиноканевой мембраной, зажатой между двумя металлическими дисками.

Давление P_1 создает на эффективных площадях f и F мембран силы N_1 и N_2 :

$$N_1 = P_1 F, \quad N_2 = P_1 f.$$

На мембранном блоке происходит алгебраическое суммирование этих сил:

$$N_p = N_1 - N_2 = P_1(F - f) = K_1 P_1.$$

Под действием результирующей силы N_p мембранный блок на величину h перемещается вниз:

$$h = K_2 N_p = K_1 K_2 P_1.$$

Это перемещение h элементом "сопло-заслонка" (торец мембранного блока – сопло) преобразуется в выходное давление:

$$P_{\text{вых}} = K_3 h = K_1 K_2 K_3 P_1 = K P_1; \quad K = K_1 K_2 K_3.$$

Таким образом, из полученного уравнения видно, что пятимембранный элемент сравнения является усилительным звеном.

Рассмотрим устройство, выполненное на пятимембранном элементе сравнения (рис. 2.1.5). В камеру Д подано давление $P_{\text{вх}}$, камеры Г и В соединены с атмосферой, а выходное давление подано в камеру Б.

Подадим на вход элемента давление $P_1 = 1$ кПа. Под действием этого давления мембранный блок перемещается вниз. Проводимость верхнего элемента "сопло-заслонка" увеличивается, а нижнего – уменьшается. Расход газа через верхнее сопло увеличивается и уменьшается сброс газа в атмосферу, при этом выходное давление увеличивается. Оно подается вновь на вход элемента, т.е. в схеме имеется обратная связь.

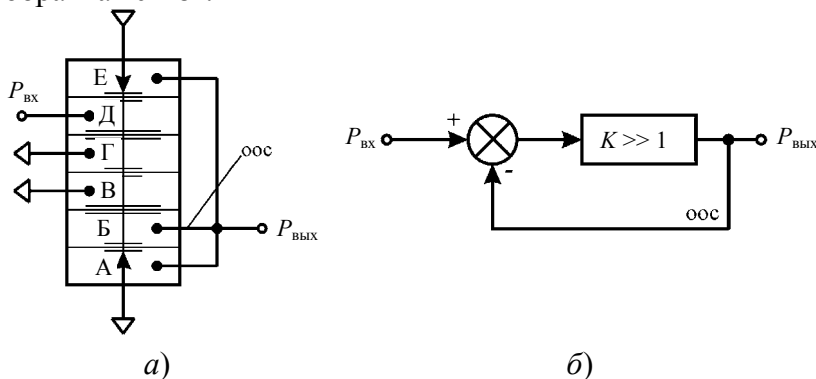


Рис. 2.1.5. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы устройства

Входное давление перемещает мембранный блок вниз. Давление в камере Б создает силу, которая препятствует перемещению мембранного блока вниз. Поэтому эта обратная связь является отрицательной. Выходное давление будет повышаться до тех пор, пока давление в камере Б не уравнивает давление в камере Д.

При наличии отрицательной обратной связи (оос) равновесие мембранного блока можно записать в виде алгебраической суммы давлений во входных камерах элемента:

$$P_{\text{Д}} - P_{\text{Г}} + P_{\text{В}} - P_{\text{Б}} = 0, \quad (2.1.2)$$

где $P_{\text{Д}} = P_{\text{вх}}$, $P_{\text{Б}} = P_{\text{вых}}$, $P_{\text{Г}} = 0$, $P_{\text{В}} = 0$.

Из уравнения (2.1.2) найдем $P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}}$.

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(s) = \frac{K}{1+K} \approx 1.$$

Преобразование Лапласа для некоторых функций, встречающихся при анализе и синтезе устройств автоматики, и ряда типовых математических операций приведены в прил. 5 и 6.

Найдем $P_{\text{ВЫХ}}$ в установившемся режиме при подаче на вход сигнала:

$$P_{\text{ВХ}} = P_0 1(t); \quad P_{\text{ВЫХ}}(s) = P_{\text{ВХ}}(s) W(s) = \frac{P_0}{s}.$$

Согласно теореме о конечном значении,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{\text{ВЫХ}}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s P_{\text{ВЫХ}}(s).$$

Тогда $P_{\text{ВЫХ}}(\infty) = s \frac{P_0}{s} = P_0.$

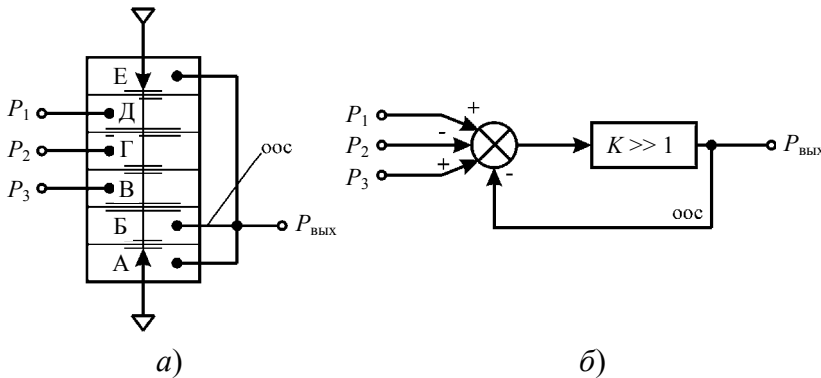


Рис. 2.1.6. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы устройства

Подадим на вход элемента сравнения три входных сигнала P_1, P_2, P_3 (рис. 2.1.6).

В устройстве (рис. 2.1.5), рассмотренном ранее, обратная связь (подача выходного давления $P_{\text{ВЫХ}}$ в камеру Б) является отрицательной обратной связью. Будет ли эта обратная связь отрицательной для входного сигнала P_2 ? Рассмотрим равновесие мембранного блока. Если выходной сигнал P_2 уменьшится, то нарушится баланс сил и уменьшится сумма сил, действующих вверх. Мембранный блок элемента начинает опускаться вниз. Выходное давление $P_{\text{ВЫХ}}$ увеличивается. В камере Б возрастает сила, направленная вверх. Движение мембранного блока прекращается. Изменение входного сигнала приводит к перемещению мембранного блока вниз, что, в свою очередь, – к увеличению выходного давления и возрастанию силы, образованной возрастающим давлением в камере Б. Обратная связь действует противоположным образом на мембранный блок, чем изменение входного сигнала. Поэтому такая обратная связь является отрицательной обратной связью.

Таким образом, элемент сравнения охвачен отрицательной обратной связью. Поэтому уравнение равновесия мембранного блока запишется как равенство нулю алгебраической суммы входных давлений:

$$+P_{\text{Д}} - P_{\text{Г}} + P_{\text{Б}} - P_{\text{Б}} = 0.$$

В соответствии со схемой устройства следует записать:

$$P_{\text{Д}} = P_1; \quad P_{\text{Г}} = P_2; \quad P_{\text{Б}} = P_3; \quad P_{\text{Б}} = P_{\text{ВЫХ}}.$$

Тогда выходной сигнал определится следующим образом:

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 - P_2 + P_3.$$

Найдем передаточные функции устройства по каждому из трех входов. При определении передаточной функции $W_1(s)$ по каналу P_1 необходимо остальные входные сигналы приравнять нулю. Тогда $W_1(s) = 1.$

Рассуждая аналогичным образом и для входных сигналов P_2 и P_3 , получим $W_2(s) = -1$, $W_3(s) = 1$. Тогда

$$P_{\text{вых}}(s) = W_1(s)P_1(s) + W_2(s)P_2(s) + W_3(s)P_3(s).$$

Для реализации потенциального выхода используется пневмоповторитель (рис. 2.1.7), который имеет две камеры А и Б, в одной из них установлено сопло. Мембрана, разделяющая две камеры, выполняет роль заслонки.

Для изучения работы повторителя представим, что в некоторый момент времени мембрана повторителя находится в равновесии, т.е. давления в камерах А и Б равны между собой. Предположим, что входной сигнал увеличился на некоторую величину и далее не изменяется. Под действием дополнительного давления создается сила, которая перемещает мембрану вниз. Уменьшается проводимость дросселя "сопло-заслонка" в камере А, что приводит к уменьшению количества воздуха, выходящего из камеры А через сопло в атмосферу. Давление в камере А возрастает до тех пор, пока не сравняется с давлением в камере Б.

Таким образом, вновь наступает равновесие, при котором $P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}}$. На структурной схеме повторитель представляется усилительным звеном, коэффициент которого равен единице. Статическая характеристика повторителя представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 2.1.7, в).

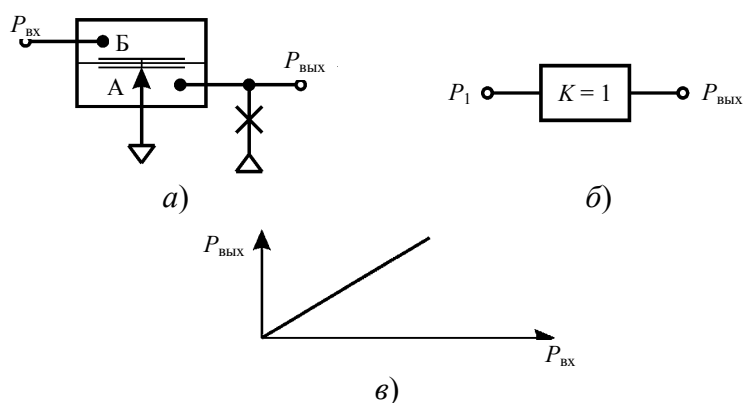


Рис. 2.1.7. Принципиальная (а), структурная (б) схемы и статическая характеристика (в) пневмоповторителя

Постоянный дроссель обеспечивает согласование проводимости сопла и количества воздуха, поступающего в камеру А от источника питания. При нулевом входном сигнале весь поступивший от источника питания в камеру А воздух выходит через открытое сопло в атмосферу. Если камеру А непосредственно подключить к питанию, то в нее поступит такое количество воздуха, что сброс через сопло его части не приведет к изменению давления. В этом случае выходной сигнал повторителя всегда равен $P_{\text{пит}}$ и не будет зависеть от входного давления.

2.2. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ, ПОСТРОЕННЫЕ НА ЭЛЕМЕНТАХ СРАВНЕНИЯ И ДРОССЕЛЯХ

Рассмотрим схему, построенную на трехмембранном элементе сравнения и дроссельном делителе (рис. 2.2.1).

Условием равновесия мембранного блока трехмембранного элемента сравнения является выражение

$$+P_B - P_B = 0.$$

На принципиальной схеме (а) линия 1 – 2 соответствует линии 1' – 2' на структурной схеме (б). Выходной сигнал $P_{\text{вых}}$ по линии 3 – 4 подается во входную камеру Б. Этой линии на структурной схеме соответствует линия 3' – 4'. Поэтому можно утверждать, что в схеме устройства имеется обратная связь (именно, линия 3 – 4). Определим знак обратной связи, для чего рассмотрим состояние равновесия, при этом на входе имеется некоторый входной сигнал $P_{\text{вх}}$ и на выходе сформирован сигнал $P_{\text{вых}}$. Мембранный блок элемента находится в равновесии. Подадим на вход единичный ступенчатый сигнал величиной P_0 .

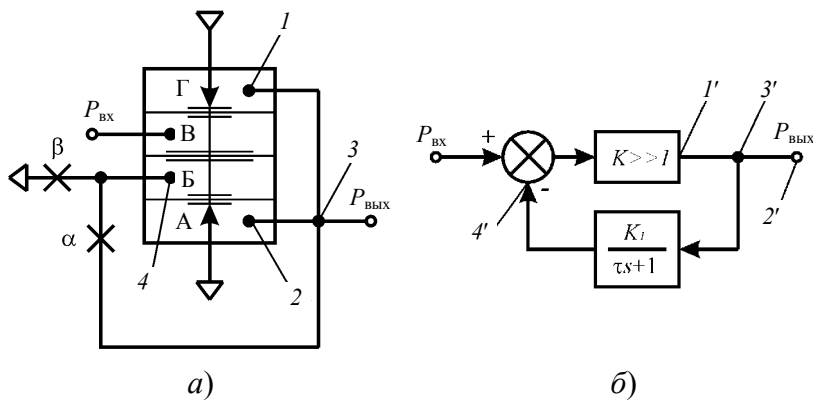


Рис. 2.2.1. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы устройства

В камере В создается дополнительная сила, которая перемещает мембранный блок вниз. Проводимость дросселя сопло-заслонка в камере Г возрастает, а проводимость дросселя сопло-заслонка в камере А уменьшается, поэтому давление на выходе увеличивается. Давление в камере Б также увеличивается, что приводит к увеличению силы, направленной вверх. Таким образом, изменение входного сигнала приводит к увеличению силы, действующей на мембранный блок вниз, а изменение обратной связи создает силу, действующую на мембранный блок вверх. Обратная связь действует в противофазе с входным сигналом, поэтому давление, поступающее в камеру В, является давлением отрицательной обратной связи. Выходное давление возрастает до тех пор, пока вновь не наступит равновесие мембранного блока.

Процессы, происходящие в устройстве в статике и динамике, описываются соответствующими уравнениями:

$$+P_B - P_B = 0; \quad \tau \frac{dP_B}{dt} + P_B = K_1 P_{\text{ВЫХ}}; \quad \tau = \frac{V}{(\alpha + \beta)RT};$$

$$P_{\text{ВХ}} = P_B; \quad K_1 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}. \quad (2.2.1)$$

Из (2.2.1) получаем дифференциальное уравнение

$$\tau \frac{dP_{\text{ВХ}}}{dt} + P_{\text{ВХ}} = K_1 P_{\text{ВЫХ}}.$$

В установившемся режиме получаем $P_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{K_1} P_{\text{ВХ}}$.

Таким образом, выходной сигнал по сравнению с входным увеличен.

Рассмотрим подробнее, почему это происходит. В обратной связи часть входного сигнала сбрасывается в атмосферу, а оставшаяся часть уравнивает входной сигнал, поэтому выходной сигнал возрастает по сравнению с входным именно на ту часть, которая стравливается в атмосферу.

Проведем анализ пневматического устройства (рис. 2.2.2), собранного на пятимембранном элементе сравнения и двух дроссельных делителях. Элемент сравнения имеет четыре входных камеры Д, Г, В и Б. Выходной сигнал $P_{\text{ВЫХ}}$ устройства, сформированный в крайних камерах А и Е, через дроссельный делитель, собранный на дросселях α_2 и β_2 , поступает во входную камеру Б. Поэтому пневматическая линия *аб*, соединяющая выход устройства с камерой Б, является обратной связью. Увеличение входного сигнала P_1 приводит к перемещению мембранного блока вниз, что, в свою очередь, приводит к увеличению $P_{\text{ВЫХ}}$. Давление в камере Б возрастает до тех пор, пока не наступит равновесие мембранного блока.

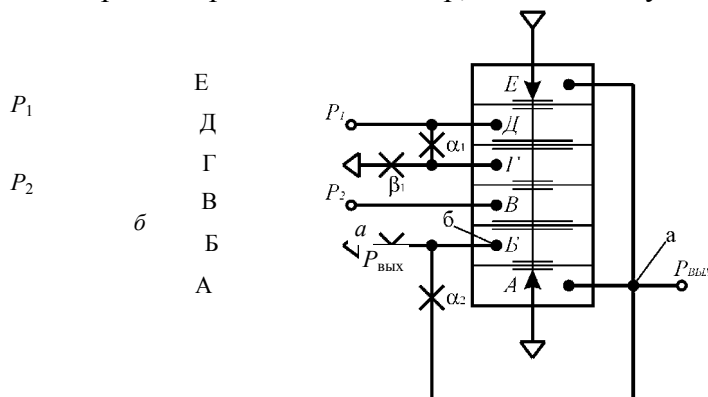


Рис. 2.2.2. Принципиальная схема устройства, собранного на пятимембранном элементе сравнения и двух дроссельных делителях

Таким образом, изменение входного сигнала приводит к перемещению вниз мембранного блока, а давление обратной связи препятствует перемещению мембранного блока, т.е. эта обратная связь является отрицательной.

При наличии отрицательной обратной связи условие равновесия мембранного блока элемента сравнения запишется как равенство нулю алгебраической суммы:

$$+P_D - P_\Gamma + P_B - P_B = 0. \quad (2.2.2)$$

В соответствии со схемой включения устройства (рис. 2.2.2)

$$P_D = P_1; \quad P_B = P_2. \quad (2.2.3)$$

На дросселях α_1, β_1 и α_2, β_2 собраны дроссельные делители, поэтому

$$P_\Gamma = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1} P_1; \quad P_B = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2} P_{\text{ВЫХ}}. \quad (2.2.4)$$

Подставив (2.2.3) и (2.2.4) в (2.2.2), получим

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{1 - K_1}{K_2} P_1 + \frac{1}{K_2} P_2, \quad (2.2.5)$$

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

По принципиальной схеме устройства и статической характеристике (2.2.5) составим структурную схему устройства. Элемент сравнения представим в виде последовательно соединенных сумматора и усилительного звена с большим коэффициентом усиления. Дроссельные делители α_1, β_1 и α_2, β_2 и соответствующие камеры Γ и B элемента сравнения представим в виде последовательно соединенных усилительных и апериодических звеньев.

Найдем передаточную функцию $W(s)$ устройства. Для этого в начале найдем передаточные функции $W_1(s)$ и $W_2(s)$ частей схемы, отмеченных на рис. 2.2.3.

Передаточную функцию $W_1(s)$ находим по правилам параллельного соединения звеньев с учетом знаков. Передаточная функция $W_2(s)$ определяется по правилам соединения звена со звеньями, стоящих в отрицательной обратной связи (см. прил. 7):

$$W_1(s) = 1 - \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} = \frac{\tau_1 s + 1 - K_1}{\tau_1 s + 1};$$

$$W_2(s) = \frac{K}{1 + \frac{KK_2}{\tau_2 s + 1}} = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{K_2}{\tau_2 s + 1}} \approx \frac{\tau_2 s + 1}{K_2}.$$

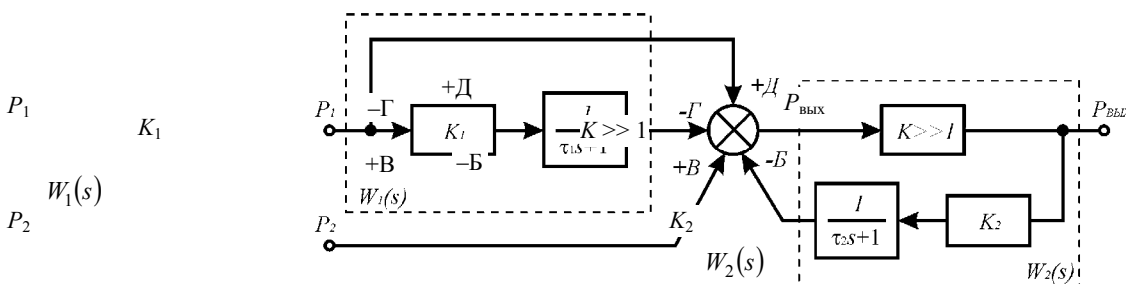


Рис. 2.2.3. Структурная схема устройства

Тогда структурная схема устройства преобразуется к виду, представленному на рис. 2.2.4.

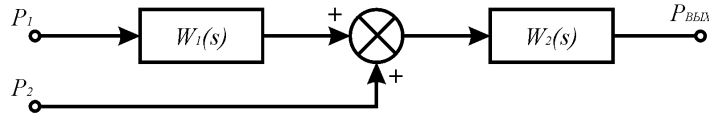


Рис. 2.2.4. Преобразованная структурная схема устройства

В данном устройстве имеется два входа. Для определения передаточной функции устройства по какому-то одному каналу необходимо значения остальных входных сигналов приравнять нулю: при $P_2 = 0$

$$W_3(s) = W_1(s)W_2(s) = \frac{\tau_1 s + 1 - K_1}{\tau_1 s + 1} \frac{\tau_2 s + 1}{K_2},$$

при $P_1 = 0$

$$W_4(s) = W_2 = \frac{\tau_2 s + 1}{K_2}, \quad (2.2.6)$$

где $W_3(s)$ и $W_4(s)$ – передаточные функции соответственно по входным каналам P_1 и P_2 .

Из выражений передаточных функций (2.2.6) найдем установившееся значение выходного сигнала при подаче на входы ступенчатых сигналов:

$$P_1(t) = P_1 1(t); \quad P_2(t) = P_2 1(t);$$

$$P_{\text{вых}}(s) = W_1(s)P_1(s) + W_2(s)P_2(s) = \frac{\tau_1 s + 1 - K_1}{\tau_1 s + 1} \frac{\tau_2 s + 1}{K_2} \frac{P_1}{s} + \frac{\tau_2 s + 1}{K_2} \frac{P_2}{s}.$$

Согласно теореме о конечном значении: $\lim_{t \rightarrow \infty} P_{\text{вых}}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s P_{\text{вых}}(s)$.

Тогда

$$P_{\text{вых}}(\infty) = \frac{1 - K_1}{K_2} P_1 + \frac{1}{K_2} P_2. \quad (2.2.7)$$

Полученное из передаточных функций выражение (2.2.6) для выходного сигнала $P_{\text{вых}}$ (2.2.7) в установившемся режиме при подаче на входы постоянных давлений P_1 и P_2 совпадает с $P_{\text{вых}}(\infty)$, рассчитанным из статических зависимостей устройства (2.2.5). Это совпадение подтверждает правильность анализа схемы устройства.

Проведем анализ устройства (рис. 2.2.5), построенного на двух пятимембранных элементах сравнения, дроссельных делителей α_1, β_1 и сумматоре α_2, β_2 .

Определим зависимость выходного давления $P_{\text{вых}}$ от входных давлений P_1 и P_2 в установившемся режиме. В элементах 1 и 2 имеются отрицательные обратные связи, поэтому условие равновесия мембранного блока для каждого из этих элементов будет иметь вид

$$+P_{\text{д}} - P_{\text{г}} + P_{\text{в}} - P_{\text{б}} = 0.$$

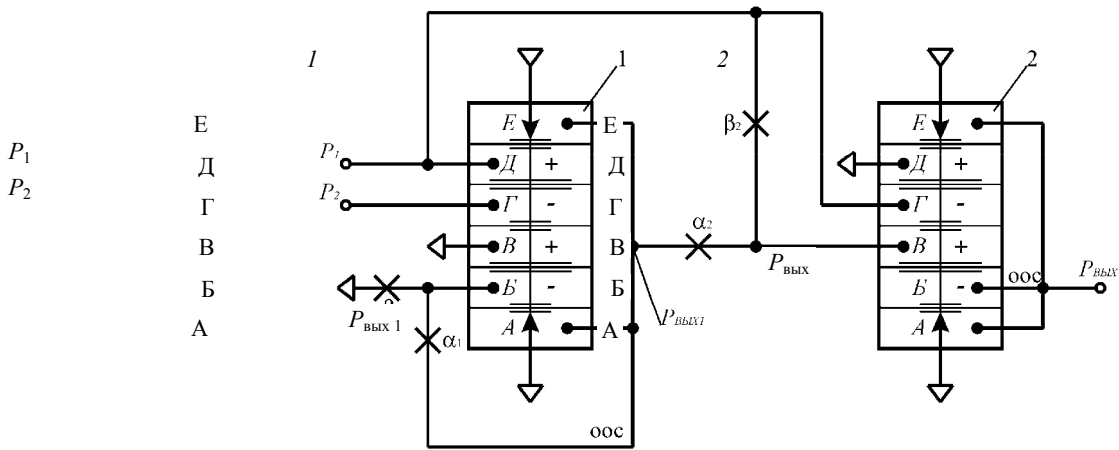


Рис. 2.2.5. Принципиальная схема устройства, построенного на двух пятимембранных элементах сравнения

Для элемента 1 давления в камерах Д, Г, В и Б в соответствии со схемой подключения определяются следующими выражениями:

$$P_D = P_1; \quad P_\Gamma = P_2; \quad P_B = 0; \quad P_B = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1} P_{\text{вых}1}.$$

Тогда для выходного сигнала $P_{\text{вых}1}$ элемента 1 справедливо равенство

$$P_{\text{вых}1} = \frac{\alpha_1 + \beta_1}{\alpha_1} (P_1 - P_2).$$

Для элемента 2 имеем:

$$P_D = 0; \quad P_\Gamma = P_1; \quad P_B = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2} P_{\text{вых}1} + \frac{\beta_2}{\alpha_2 + \beta_2} P_1; \quad P_B = P_{\text{вых}}.$$

Тогда

$$P_{\text{вых}} = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2} \left(\frac{\beta_1}{\alpha_1} P_1 - \frac{\alpha_1 + \beta_1}{\alpha_1} P_2 \right). \quad (2.2.8)$$

По принципиальной схеме устройства составим структурную схему (рис. 2.2.6). Найдем передаточные функции $W_1(s)$ и $W_2(s)$, заметив что в соединении исходных звеньев использована отрицательная обратная связь. Примеры нахождения передаточной функции системы, имеющей различные виды соединений звеньев, приведены в прил. 7.

$$W_1(s) = \frac{K}{1 + \frac{KK_1}{\tau_1 s + 1}} = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{K_1}{\tau_1 s + 1}} \approx \frac{\tau_1 s + 1}{K_1};$$

$$W_2(s) = \frac{K}{1 + K} \approx 1,$$

где $K_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_2}$, $\tau_1 = \frac{V}{(\alpha_1 + \beta_1)RT}$.

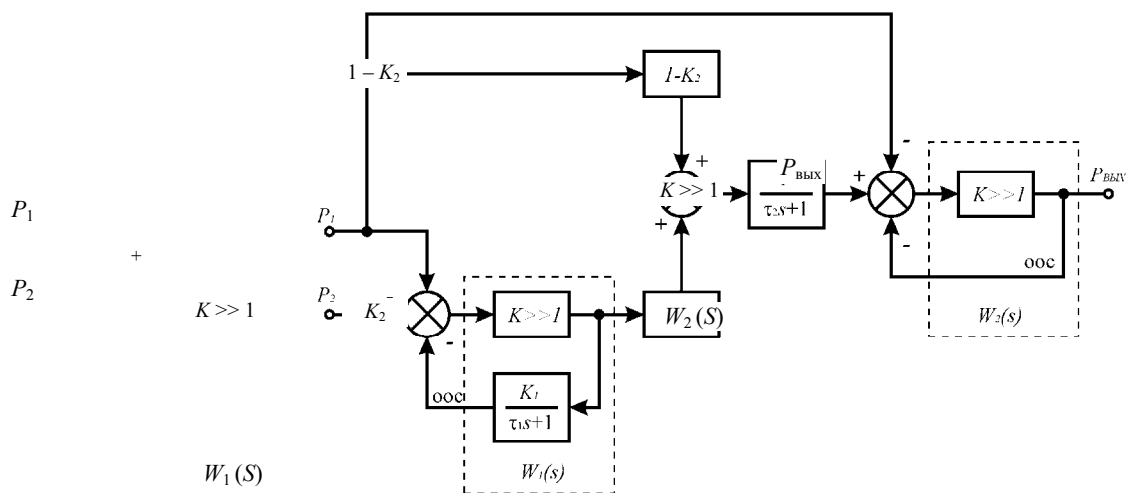


Рис. 2.2.6. Структурная схема устройства

Структурная схема устройства преобразуется к виду, приведенному на рис. 2.2.7.

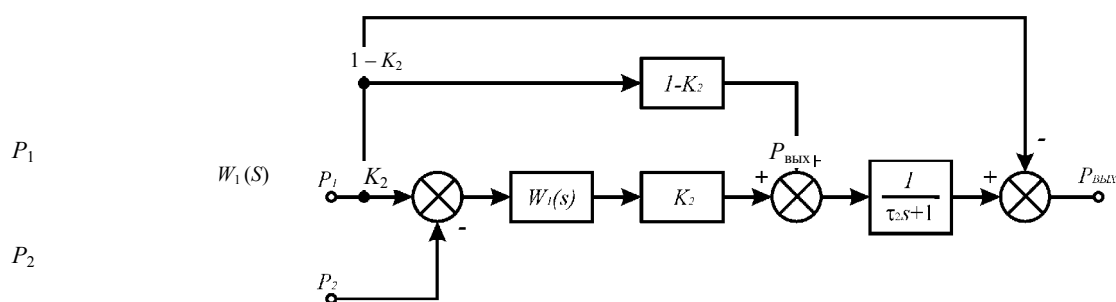


Рис. 2.2.7. Преобразованная структурная схема устройства

Определим передаточную функцию $W_3(s)$ устройства по каналу P_1 , при этом значение давления, подаваемого на второй вход примем равным нулю ($P_2 = 0$):

$$W_3(s) = \left[\frac{K_2}{K_1}(\tau_1 s + 1) + 1 - K_2 \right] \frac{1}{\tau_2 s + 1} - 1,$$

где $K_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2}$; $\tau_2 = \frac{V}{(\alpha_2 + \beta_2)RT}$.

Передаточная функция $W_4(s)$ по каналу P_2 при условии $P_1 = 0$ имеет вид

$$W_4(s) = \frac{(\tau_1 s + 1)K_2}{(\tau_2 s + 1)K_1}.$$

Найдем по передаточной функции значение выходного сигнала в установившемся режиме при подаче на вход сигналов $P_1(t) = P_1 1(t)$ и $P_2(t) = P_2 1(t)$:

$$P_{\text{вых}}(s) = W_3(s)P_1(s) + W_4(s)P_2(s);$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{\text{вых}}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s P_{\text{вых}}(s) = P_1 \left(\frac{K_2}{K_1} - K_2 \right) - \frac{K_2}{K_1} P_2. \quad (2.2.9)$$

Совпадение результатов (2.2.8) и (2.2.9) подтверждает правильность составления структурной схемы.

2.3. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

1. Какая операция выполняется пятимембранным элементом при подаче на его входы четырех давлений?
2. Какие особенности схем повторителей, выполненных на основе трех- и пятимембранных элементов сравнения?
3. Какие Вы знаете схемы включения элементов сравнения, выполняющие операцию умножения входного давления на коэффициент больше единицы?
4. Какие Вы знаете схемы включения элементов сравнения, выполняющие операцию умножения входного давления на коэффициент меньше единицы?
5. На основании каких законов выводится уравнение равновесия мембранного блока элемента сравнения?
 6. Какое преобразование информации происходит в элементе сравнения?
 2. Какова конструкция мембранного блока элемента сравнения?
 3. Каково назначение мембранного блока элемента сравнения?
 4. Как формируется выходной сигнал в элементе сравнения?
 5. Как формируется обратная связь в элементе сравнения?
 6. Каким типовым звеном представляется элемент сравнения на структурной схеме?
 7. С какой целью нижнее сопло элемента сравнения соединяется с атмосферой?
 8. С какой целью верхнее сопло элемента сравнения соединено с источником питания?
 9. С какой целью соединяются крайние камеры элемента сравнения?
 10. Какое назначение мембран элемента сравнения?
 11. При выполнении каких условий уравнением равновесия мембранного блока элемента сравнения является равенство нулю алгебраической суммы входных давлений?
 12. Какими типовыми звеньями представляется дроссельный делитель на структурной схеме?
 13. Почему в статике выходной сигнал элемента сравнения, в отрицательную обратную связь которого включен дроссельный делитель, больше входного?
 14. Какую функцию выполняет мембранный блок в элементе сравнения?
 15. Какую функцию выполняют дроссели типа "сопло-заслонка" в элементе сравнения?
 16. Какая необходима аппаратура для снятия статической характеристики пневмоповторителя?
 17. Как работает отрицательная обратная связь в элементе сравнения?
 18. Как доказать, что элемент сравнения на структурной схеме представляется усилительным звеном с большим коэффициентом усиления?
 19. Какова структурная схема устройства, выполняющего операцию умножения входного давления на коэффициент больше единицы?
 20. Какова структурная схема устройства, выполняющего операцию умножения входного давления на коэффициент меньше единицы?
 21. Какова структурная схема устройства, сравнивающего два давления?
 22. Какова структурная схема устройства, определяющего сумму двух давлений?
 23. Какова структурная схема устройства, определяющего разность двух давлений?
 24. Какие правила преобразования структурных схем применяются в автоматике?
 25. Как определяется эффективная площадь мембран элемента сравнения?
 26. С какой точностью поддерживается давление питания элемента сравнения?
 27. Какую функцию в схемах пневмоавтоматики выполняет пневмоповторитель?
 28. Какую функцию выполняет дроссель, стоящий в цепи питания пневмоповторителя?
 29. Как определяется передаточная функция устройства, имеющего несколько входов?

2.4. ТЕСТ ПО МАТЕРИАЛАМ ВТОРОЙ ГЛАВЫ

- 1 Уравнение равновесия мембранного блока элемента сравнения определяется как ...
 - а) сумма входных давлений;
 - б) разность входных давлений;
 - в) сумма входных давлений, умноженных на соответствующие коэффициенты;
 - г) алгебраическая сумма входных давлений.
- 2 К пятимембранному элементу сравнения можно подключить следующее максимальное число входных давлений:
 - а) одно;
 - б) два;
 - в) три;

- г) четыре.
- 3 Пятимембранный элемент сравнения является следующим звеном автоматики:
- а) интегрирующим;
 - б) усилителем;
 - в) запаздывающим;
 - г) инерционным.
- 4 В системе УСЭППА имеются мембранные элементы сравнения ... давлений.
- а) двух;
 - б) трех и двух;
 - в) четырех и двух;
 - г) пяти и трех.
- 5 Давление питания элементов УСЭППА ...
- а) 1 кПа;
 - б) 100 кПа;
 - в) 1 МПа;
 - г) 0,14 МПа.
- 6 Давление в 1 Па равно ...
- а) 1 кгс/см^2 ;
 - б) 10^{-3} Н/м^2 ;
 - в) 10 Н/м^2 ;
 - г) 1 Н/м^2 .
- 7 Обратная связь может быть ...
- а) отрицательной;
 - б) положительной;
 - в) нейтральной;
 - г) отрицательной и положительной.
- 8 Статическая характеристика пневмоповторителя представляет собой прямую, расположенную к оси X под углом ...
- а) 25° ;
 - б) 35° ;
 - в) 45° ;
 - г) в зависимости от проводимости дросселя в цепи питания.
- 9 В устройстве (рис. 2.2.2) линия ab является обратной связью ...
- а) положительной;
 - б) отрицательной;
 - в) нейтральной;
 - г) отрицательной и положительной.
- 10 Пятимембранный элемент сравнения включен с отрицательной обратной связью. На вход элемента поданы три давления. Выходной сигнал равен ...
- а) сумме входных давлений;

- б) разности входных давлений;
- в) алгебраической сумме входных давлений;
- г) 1 или 0 в зависимости от величин входных давлений.

11 Пятимембранный элемент сравнения включен с положительной обратной связью. На вход элемента поданы три давления. Выходной сигнал равен ...

- а) сумме входных давлений;
- б) разности входных давлений;
- в) алгебраической сумме входных давлений;
- г) 1 или 0 в зависимости от величин входных давлений.

12 Пятимембранный элемент сравнения включен без обратной связи. На вход элемента поданы четыре давления. Выходной сигнал равен ...

- а) сумме входных давлений;
- б) разности входных давлений;
- в) алгебраической сумме входных давлений;
- г) 1 или 0 в зависимости от величин входных давлений.

13 Условием равновесия мембранного блока элемента сравнения, включенного с отрицательной обратной связью, является равенство нулю ...

- а) суммы входных давлений;
- б) алгебраической суммы входных давлений;
- в) суммы произведения коэффициентов на входные давления;
- г) алгебраической суммы произведения коэффициентов на входные давления.

14 Обратная связь в устройстве – это такая связь, когда ...

- а) входной сигнал подается на выход устройства;
- б) выходной сигнал подается на вход устройства;

15 Теорема о конечном значении записывается следующим образом:

- а) $\lim_{t \rightarrow 0} P(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sP(s)$;
- б) $\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sP(s)$;
- в) $\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = \lim_{s \rightarrow 0} P(s)$;
- г) $\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = \lim_{s \rightarrow 0} P(s)$.

16 Отрицательная обратная связь в элементе сравнения – это такая обратная связь, которая действует на мембранный блок элемента ...

- а) так же как входной сигнал;
- б) противоположным образом по сравнению с входным сигналом.

17 Положительная обратная связь в элементе сравнения – это такая обратная связь, которая действует на мембранный блок элемента ...

- а) так же как входной сигнал;

б) противоположным образом по сравнению с входным сигналом.

3. СИНТЕЗ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Процесс синтеза пневматических устройств наиболее целесообразно изучать на конкретных примерах. Будем использовать синтез на основе априорных знаний возможностей пневматических элементов, т.е. так называемый эвристический синтез.

3.1. СИНТЕЗ АНАЛОГОВЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПО ЗАДАНЫМ СТАТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Рассмотрим, как синтезируются аналоговые пневматические устройства по заданным статическим характеристикам. В качестве статических характеристик выбраны характерные операции: суммирование трех давлений, суммирование давлений с весовыми коэффициентами, деление входного сигнала на целое число.

Суммирование трех давлений, т.е. $P_{\text{ВЫХ}} = P_1 + P_2 + P_3$, возможно осуществлять двумя путями: используя дроссельный сумматор или мембранные элементы сравнения. Дроссельный сумматор осуществляет суммирование давлений с коэффициентами, определяемыми проводимостями дросселей. Поэтому выходной сигнал дроссельного сумматора определяется суммой произведений входных давлений на коэффициенты, каждый из которых меньше единицы. Следовательно, на сумматоре нельзя синтезировать устройство, имеющее заданную статическую характеристику.

Как было выяснено в п. 2.1, выходной сигнал пятимембранного элемента сравнения, охваченного отрицательной обратной связью, равен алгебраической сумме трех входных давлений, причем два давления входят в сумму со знаком плюс, а одно давление – со знаком минус. Поэтому необходимо использовать два пятимембранных элемента сравнения, при этом на первом элементе осуществлять сложение двух входных давлений, а на втором элементе формируется сумма третьего входного давления и суммы двух первых давлений.

Таким образом, синтезируемое устройство (рис. 3.1.1) должно содержать последовательно соединенные два пятимембранных элемента сравнения, имеющих отрицательные обратные связи, причем два входных давления должны быть подключены к первому элементу, а третье давление – ко второму элементу.

Проведем анализ синтезированного устройства. Равновесие мембранных блоков элементов сравнения 1 и 2 описывается уравнением

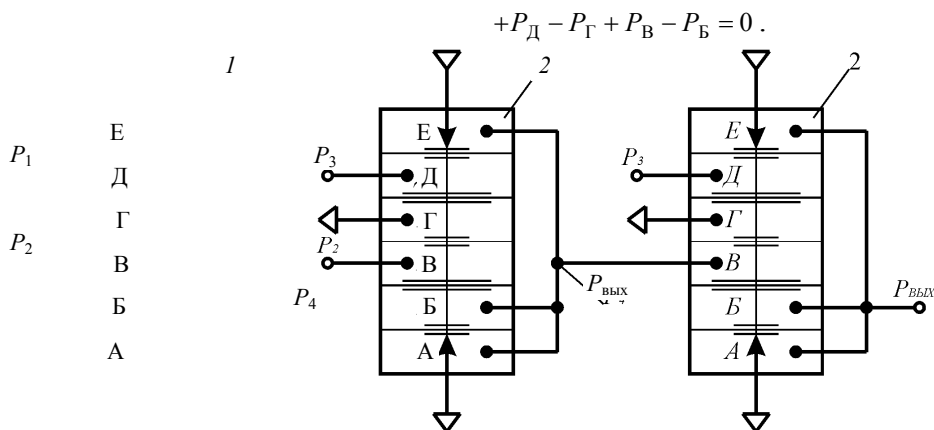


Рис. 3.1.1. Принципиальная схема устройства

Для первого элемента сравнения справедливы равенства:

$$P_D = P_1; \quad P_\Gamma = 0; \quad P_B = P_2; \quad P_B = P_4.$$

Тогда давление на выходе первого элемента определяется следующим образом:

$$P_4 = P_1 + P_2.$$

Для второго элемента сравнения справедливы равенства:

$$P_D = P_3; \quad P_\Gamma = 0; \quad P_B = P_4; \quad P_E = P_{\text{ВЫХ}}.$$

Из последнего равенства получаем значение выходного давления

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 + P_2 + P_3.$$

Таким образом, синтезированное устройство действительно реализует в статике требуемую зависимость.

Синтезируем на элементах пневмоавтоматики схему, реализующую в статике зависимость $P_{\text{ВЫХ}} = K_1 P_1 + K_2 P_2$, причем $K_1 > 1$ и $K_2 < 1$.

Для реализации зависимости необходимо выполнить две математические операции: умножение на постоянный коэффициент и операцию сложения.

Умножение на коэффициент больше единицы возможно реализовать на трехмембранном элементе сравнения, причем в отрицательной обратной связи необходимо установить дроссельный делитель. Выходной сигнал будет больше, чем входной, так как часть этого сигнала стравливается в атмосферу, а оставшаяся часть будет уравниваться входной сигнал.

Умножение на коэффициент меньше единицы можно реализовать на трехмембранном элементе сравнения, причем входной сигнал соединить через дроссельный делитель с положительной камерой. Часть входного сигнала стравится в атмосферу, а другая часть уравнивается выходным сигналом. Тогда выходной сигнал будет меньше входного.

Сложение полученных сигналов возможно выполнить на пятимембранном элементе сравнения, в котором имеется отрицательная обратная связь. Полученное устройство приведено на рис. 3.1.2.

Проведем анализ синтезированной схемы. Давления в соответствующих камерах элемента сравнения I описываются уравнениями:

$$+P_B - P_B = 0; \quad P_B = P_1; \quad P_B = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} P_3. \quad (3.1.1)$$

Из (3.1.1) получаем значение выходного сигнала

$$P_3 = K_1 P_1, \quad (3.1.2)$$

где $K_1 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1} > 1$.

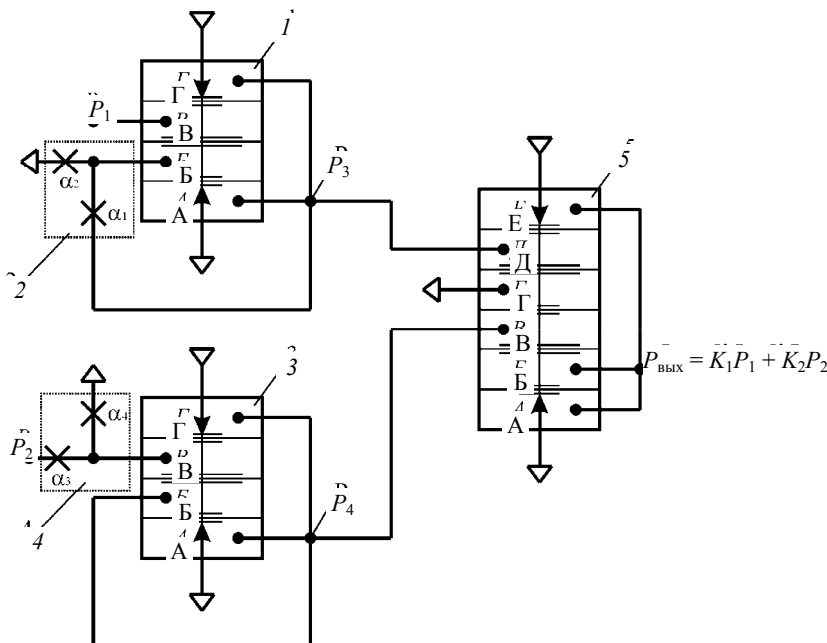


Рис. 3.1.2. Принципиальная схема синтезированного устройства

Давления в соответствующих камерах сравнения 3 описываются уравнениями:

$$+P_B - P_B = 0; \quad P_B = \frac{\alpha_3}{\alpha_3 + \alpha_4} P_2; \quad P_B = P_4. \quad (3.1.3)$$

Из (3.1.3.) получаем значение давления P_4 :

$$P_4 = K_2 P_2, \quad (3.1.4)$$

где $K_2 = \frac{\alpha_3}{\alpha_3 + \alpha_4} < 1$.

Равновесие мембранного блока элемента сравнения 5 описывается уравнениями:

$$+P_D - P_\Gamma + P_B - P_B = 0; \quad P_D = P_3; \quad P_\Gamma = 0; \\ P_B = P_4; \quad P_B = P_{\text{ВЫХ}}. \quad (3.1.5)$$

Из (3.1.5.) получим значение выходного сигнала

$$P_{\text{ВЫХ}} = K_1 P_1 + K_2 P_2,$$

причем $K_1 > 1$ и $K_2 < 1$.

Таким образом, синтезированная схема устройства (рис. 3.1.2) действительно реализует заданную статическую характеристику.

Устройство, реализующее деление входного давления на число n , т.е. $P_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{n} P_{\text{ВХ}}$, возможно реализовать на дроссельном делителе при определенном соотношении проводимостей дросселей $\beta = (n-1)\alpha$ и трехмембранном элементе сравнения (рис. 3.1.3).

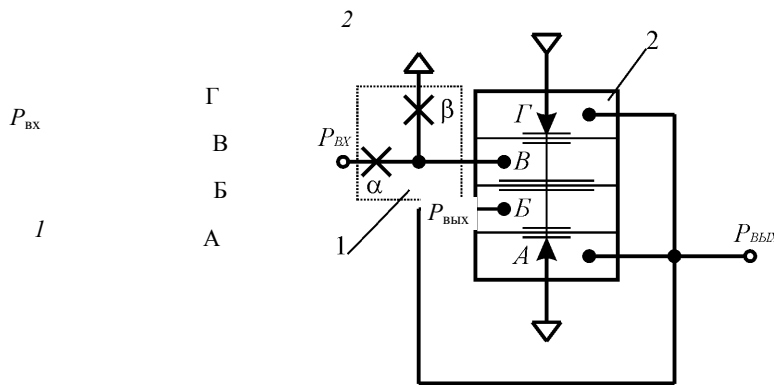


Рис. 3.1.3. Принципиальная схема устройства

Проведем анализ синтезированного устройства. Дроссельный делитель 1 и элемент сравнения 2 описываются уравнениями:

$$\beta = (n-1)\alpha; \quad P_B = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} P_{\text{ВХ}}; \quad +P_B - P_B = 0; \quad P_B = P_{\text{ВЫХ}}.$$

Выражение для выходного сигнала имеет вид: $P_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{n} P_{\text{ВХ}}$.

В случае, если число n можно представить в виде некоторой степени числа два, т.е. $n = 2^k$, $k = 1, 2, \dots$, то устройство возможно построить на последовательно включенных пятимембранных элементах сравнения, имеющих по две отрицательных обратных связи. Число элементов сравнения равно показателю степени. Для $n = 4$ устройство (рис. 3.1.4) содержит два элемента сравнения.

Уравнение равновесия мембранного блока

$$+P_D - P_\Gamma + P_B - P_B = 0. \quad (3.1.6)$$

Для элемента 1 справедливы равенства:

$$P_D = P_{\text{вх}}; \quad P_\Gamma = P_1; \quad P_B = 0; \quad P_B = P_1. \quad (3.1.7)$$

Подставив (3.1.7) в (3.1.6), получим значения давления P_1 :

$$P_1 = \frac{1}{2} P_{\text{вх}}. \quad (3.1.8)$$

Для входных давлений элемента 2 справедливы равенства:

$$P_D = P_1; \quad P_\Gamma = P_{\text{вых}}; \quad P_B = 0; \quad P_B = P_{\text{вых}}. \quad (3.1.9)$$

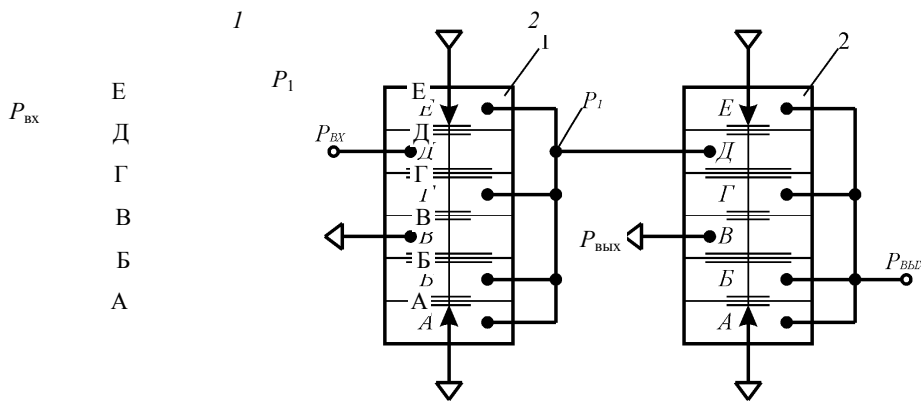


Рис. 3.1.4. Принципиальная схема устройства

Подставив (3.1.9) в (3.1.6) и используя (3.1.8), получим значение давления $P_{\text{вых}}$:

$$P_{\text{вых}} = \frac{1}{2} P_1 = \frac{1}{4} P_{\text{вх}}.$$

Таким образом, синтезированная схема действительно реализует заданную формулу.

В случае если число n – четное, но не представимое в виде степени числа два, то его можно представить в виде $n = 2n_1$. Число n_1 реализуется на дроссельном делителе, имеющем соотношение проводимостей $\beta = (n_1 - 1)\alpha$, а число 2 – на пятимембранном элементе сравнения, имеющем две отрицательные обратные связи. Для случая $n = 6$ устройство имеет следующий вид (рис. 3.1.5).

Дроссельный делитель 1 и элемент сравнения 2 описываются следующими уравнениями:

$$P_B = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} P_{\text{вх}}; \quad +P_B - P_B = 0; \quad P_B = P_1.$$

Соотношение проводимостей дросселей равно $\beta = 2\alpha$. Тогда выходной сигнал P_1 элемента сравнения 2 равен

$$P_1 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} P_{\text{вх}} = \frac{1}{3} P_{\text{вх}}.$$

Уравнение равновесия мембранного блока элемента сравнения 3 имеет вид

$$+P_D - P_\Gamma + P_B - P_B = 0.$$

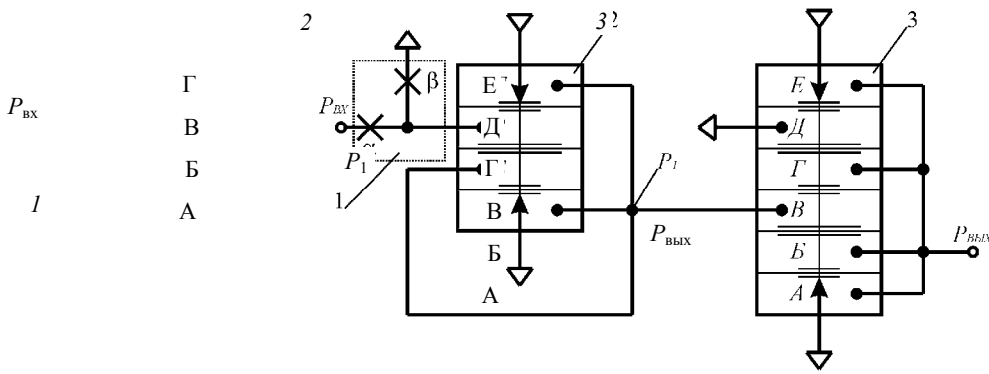


Рис. 3.1.5. Принципиальная схема устройства

В соответствии со схемой устройства имеем:

$$P_D = 0; \quad P_\Gamma = P_{\text{ВЫХ}}; \quad P_B = P_1; \quad P_Б = P_{\text{ВЫХ}}.$$

Тогда $P_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{2}P_1 = \frac{1}{6}P_{\text{ВХ}}.$

Таким образом, синтезированное устройство реализует заданную статическую характеристику.

3.2. СИНТЕЗ АНАЛОГОВЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПО ЗАДАНЫМ ПЕРЕДАТОЧНЫМ ФУНКЦИЯМ

В устройствах контроля и управления возникает задача синтеза звеньев с заданными динамическими характеристиками, которые наиболее часто описываются математическими операциями интегрирования и дифференцирования. Обычно эти характеристики задаются в виде передаточной функции.

Как создать пневматическое аналоговое устройство, выходной сигнал которого растет с постоянной скоростью при постоянном входном сигнале? Такое устройство является интегрирующим, которому соответствует передаточная функция

$$W(s) = \frac{1}{\tau_{\text{и}} s}.$$

Из теории автоматического регулирования известно, что в интегрирующем звене связь между входным и выходным сигналами имеет вид

$$P_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^t P_{\text{ВХ}}(\tau) d\tau. \tag{3.2.1}$$

Как можно физически представить процесс интегрирования? К предыдущему значению прибавляется некоторая величина, т.е. интегрирование во времени можно представить себе как процесс накопления.

В пневматических системах накапливать газ необходимо в закрытом пространстве (емкости), поэтому рассмотрим устройство (рис. 3.2.1), состоящее из последовательно соединенных дросселя и емкости.

Процесс изменения давления $P_{\text{ВЫХ}}$ в емкости при заполнении ее газом через дроссель описывается дифференциальным уравнением

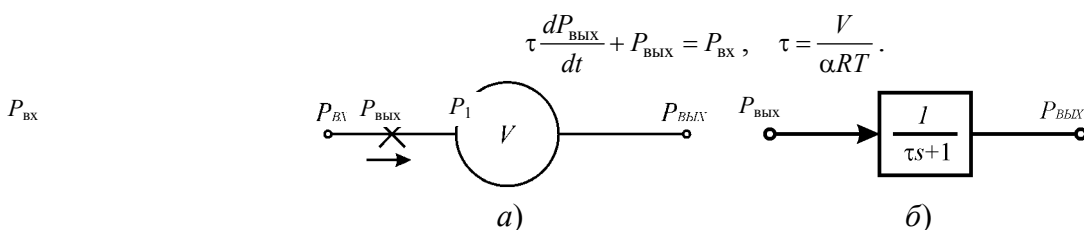


Рис. 3.2.1. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы устройства

Соединение емкости и дросселя является аperiodическим звеном. Подадим на его вход ступенчатый сигнал $P_{\text{вх}}(t) = P_0 1(t)$ (рис. 3.2.2) и сравним его выход $P_1(t)$ с выходом $P_2(t)$ интегрирующего звена:

$$P_1(t) = P_0 \left(1 - \exp \left[-\frac{t}{\tau} \right] \right); \quad P_2(t) = \frac{P_0}{\tau} t.$$

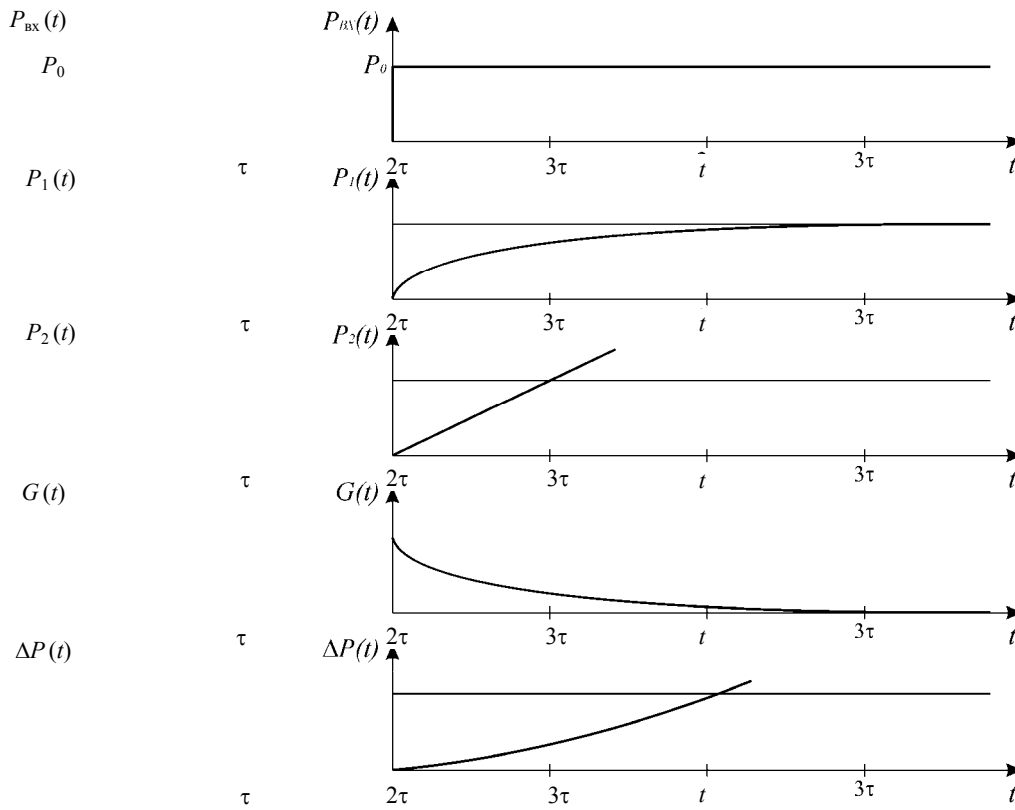


Рис. 3.2.2. Временные зависимости давлений в аperiodическом и интегрирующем звеньях

Найдем разность этих выходных сигналов:

$$\Delta P(t) = P_2(t) - P_1(t) = P_0 \left(\frac{t}{\tau} - 1 + \exp \left[-\frac{t}{\tau} \right] \right).$$

При заданной погрешности ΔP_3 можно утверждать, что существует такой интервал времени $(0, t_1)$, в котором эти выходные сигналы отличаются не более, чем на ΔP_3 .

С течением времени разность возрастает, т.е. вне диапазона $(0, t_1)$ выходной сигнал интегрирующего звена существенно отличается от выходного сигнала аperiodического звена.

Найдем причину, из-за которой выходной сигнал аperiodического звена увеличивается с уменьшающейся скоростью. В интегрирующем звене за каждый промежуток времени суммируется постоянное значение величины. В аperiodическом звене расход, проходящий через дроссель, уменьшается, так как уменьшается разность давлений вследствие того, что выходной сигнал увеличивается. Характеристики типовых звеньев систем автоматического регулирования приведены в прил. 8.

Расход газа определяет скорость нарастания количества его в емкости. В аperiodическом звене этот расход пропорционален разности входного и выходного сигналов. В каждый последующий момент времени в емкость поступает все меньшее количество газа.

Для того чтобы выходной сигнал возрастал с постоянной скоростью, необходимо и достаточно подавать в емкость одинаковое (постоянное) количество газа в каждый момент времени. Это может быть обеспечено, если разность входного и выходного давлений будет постоянным. При возрастании входного давления (это так и должно быть в нормально работающем звене) разность будет постоянной, если организовать схему устройства так, чтобы входной сигнал возрастал именно на такую величину, на ка-

кую возрастает выходной сигнал. Это возможно осуществить, если к входному сигналу прибавлять выходной сигнал, т.е. в схему ввести положительную обратную связь (рис. 3.2.3).

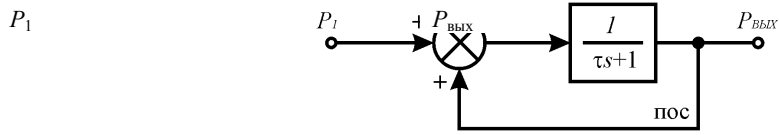


Рис. 3.2.3. Структурная схема устройства с положительной обратной связью

Передаточную функцию полученного устройства определим по известному правилу (см. прил. 8):

$$W(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{\tau s + 1}} = \frac{1}{\tau s}$$

Действительно, охватив апериодическое звено единичной положительной обратной связью, получим интегрирующее звено.

По полученной структурной схеме устройства создадим принципиальную пневматическую схему (рис. 3.2.4). Наиболее просто суммирование реализовать на пятимембранном элементе сравнения, как рассмотрено ранее (рис. 2.1.6).

По принципиальной схеме (рис. 3.2.4) найдем выходной сигнал. Элемент сравнения охвачен отрицательной обратной связью (камера Б). Поэтому условие равновесия мембранного блока элемента запишем как равенство нулю алгебраической суммы давлений во входных камерах Д, Г, В и Б:

$$+P_D - P_G + P_B - P_B = 0.$$

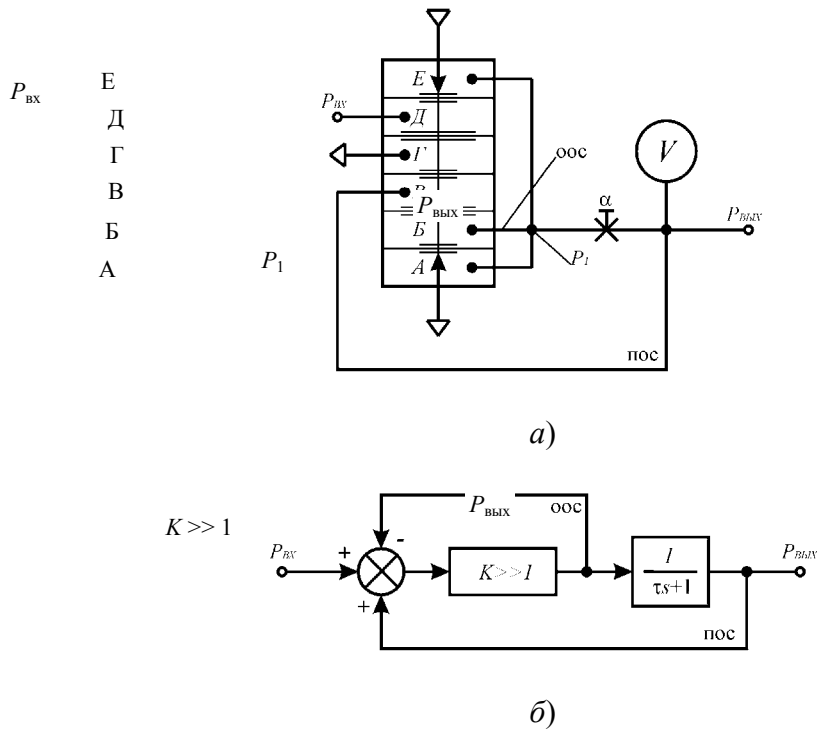


Рис. 3.2.4. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы интегрирующего звена

В соответствии со схемой включения элемента сравнения имеем:

$$P_D = P_{вх}; \quad P_G = 0; \quad P_B = P_{вых}; \quad P_B = P_1.$$

Тогда $P_1 = P_{вх} + P_{вых}$.

Апериодическое звено, собранное на дросселе и емкости, описывается уравнением

$$\tau_1 \frac{dP_{вых}}{dt} + P_{вых} = P_1 = P_{вх} + P_{вых}. \quad (3.2.2)$$

Из (3.2.2) получаем $P_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{\tau_1} \int_0^t P_{\text{вх}}(\tau) d\tau$.

Таким образом, действительно получили принципиальную схему интегрирующего звена.

При измерении некоторых технологических параметров, например, уровня жидкости в емкостях, в системе контроля необходимо формировать сигнал, пропорциональный сумме текущего значения параметра и скорости его изменения. Анализ такого сигнала позволяет прогнозировать величину параметра. Другими словами такой сигнал предвещает событие. Устройство, формирующее такой сигнал, имеет передаточную функцию вида $W(s) = \tau s + 1$.

В начале решения задачи обратим внимание на тот факт, что выражение заданной передаточной функции является знаменателем в передаточной функции апериодического звена. Создадим устройство, в структурной схеме которого апериодическое звено установлено в цепь обратной связи (рис. 3.2.5).

С каким знаком взять обратную связь? У нас пока нет дополнительной информации, которая позволила бы однозначно ответить на этот вопрос. Поэтому в выражении передаточной функции запишем знаки плюс и минус. Передаточную функцию звена, стоящего в прямой цепи, пока не знаем. Передаточная функция устройства имеет вид

$$W(s) = \frac{W_1(s)}{1 \pm \frac{W_1(s)}{\tau s + 1}} = \frac{1}{\frac{1}{W_1(s)} \pm \frac{1}{\tau s + 1}}$$

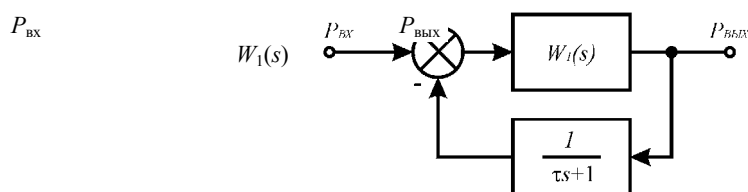


Рис. 3.2.5. Структурная схема синтезируемого устройства

Передаточная функция устройства будет равна заданной, если $|W_1(s)| \gg |\tau s + 1|$ и в устройстве имеется отрицательная обратная связь. Тогда первый член знаменателя становится близок к нулю.

Таким образом, если усилительное звено с большим коэффициентом усиления охватить отрицательной обратной связью, в которой расположено апериодическое звено, причем постоянная времени этого звена значительно меньше коэффициента усиления, то будем иметь устройство, имеющее заданную передаточную функцию.

При подаче на вход ступенчатого сигнала $P_{\text{вх}} = P_0 1(t)$ выходной сигнал будет равен:

$$P_{\text{вых}}(s) = W(s) \frac{P_0}{s} = P_0 \tau + \frac{P_0}{s}; \quad P_{\text{вых}}(t) = \delta(t) + P_0 1(t).$$

По структурной схеме (рис. 3.2.5) составим принципиальную схему, построенную на элементах УСЭППА (рис. 3.2.6).

Усилительное звено и сумматор выполним на трехмембранном элементе сравнения. Передаточную функцию полученного устройства определим по известному правилу. Таким образом, синтезировали устройство, имеющее заданную передаточную функцию.

Рассматриваемое устройство имеет широкое техническое применение. Выходной сигнал устройства складывается из двух сигналов: один сигнал пропорционален скорости изменения входного сигнала, а второй сигнал равен входному сигналу. Зная величину входного сигнала и скорость его изменения можно вычислить величину сигнала, которую он будет иметь через некоторое время. Другими словами можно предвещать событие. Поэтому это устройство носит название "устройство предвещения".

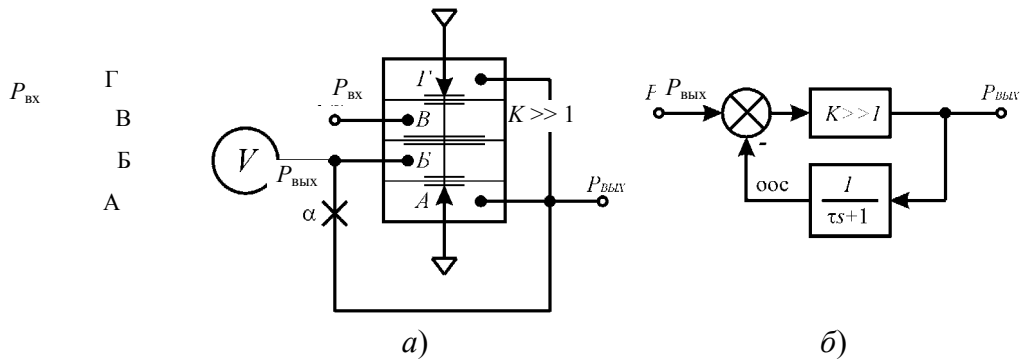


Рис. 3.2.6. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы устройства

Одним из возможных применений устройства проиллюстрируем на примере сигнализации верхнего предела уровня в баке. Датчик формирует сигнал, пропорциональный текущему значению уровня. На выходе схемы сравнения появляется сигнал, информирующий о том, что текущее значение уровня превышает заданное. Звучит сирена и загорается лампочка. Оператор отключает сирену и включает насос на откачку жидкости из этого бака. Оператору важна информация о том, стал ли на самом деле уровень уменьшаться или нет. Если уменьшается, то не произойдет перелива. По величине выходного сигнала устройства предварения оператор может оценить, чему будет равен уровень через заданный промежуток времени.

Для формирования выходного сигнала, опережающего входной, используют устройство, имеющее передаточную функцию $W(s) = \tau s$.

В апериодическом звене сформируем выходной сигнал следующим образом (рис. 3.2.7).

Устройство описывается уравнениями:

$$G = \alpha(P_{\text{ВХ}} - P_V); \quad G = \frac{d\theta}{dt}; \quad P_V V = \theta RT; \quad P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ}} - P_V. \quad (3.2.3)$$

Эти уравнения описывают расход газа через дроссель, поступление газа в емкость, состояние газа в емкости и формирование выходного сигнала.

Из (3.2.3) получим уравнение

$$P_{\text{ВЫХ}} = \tau \frac{d(P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}})}{dt}.$$

Таким образом, получили звено, осуществляющее дифференцирование. Этот процесс происходит с методической погрешностью, т.е. реально определяется скорость изменения разности выходного и входного сигналов. С целью устранения этой погрешности необходимо суммировать входной сигнал с выходным, т.е. следует ввести положительную обратную связь (рис. 3.2.8).

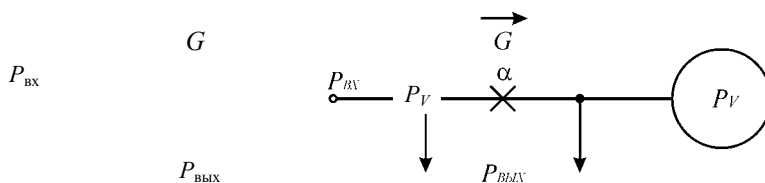


Рис. 3.2.7. Схема устройства для формирования выходного сигнала

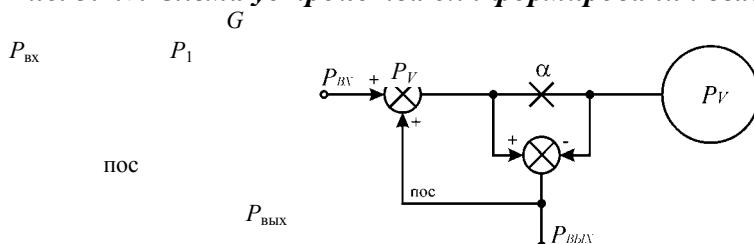


Рис. 3.2.8. Схема дифференцирующего устройства

Процессы, происходящие в устройстве, описываются уравнениями:

$$P_1 = P_{\text{ВХ}} + P_{\text{ВЫХ}}; \quad P_{\text{ВЫХ}} = P_1 - P_V; \quad G = \alpha(P_1 - P_V); \quad P_V V = \theta RT; \quad G = \frac{d\theta}{dt}. \quad (3.2.4)$$

Из (3.2.4) получим $P_{\text{ВЫХ}} = \tau \frac{dP_{\text{ВХ}}}{dt}$.

По структурной схеме составим принципиальную схему (рис. 3.2.9). Сумматоры построим на элементах сравнения с отрицательными обратными связями.

Уравнение равновесия мембранных блоков имеет вид

$$+P_D - P_\Gamma + P_B - P_Б = 0.$$

Давления в камерах первого элемента сравнения:

$$P_D = P_{\text{ВХ}}; \quad P_\Gamma = 0; \quad P_B = P_{\text{ВЫХ}}; \quad P_Б = P_1.$$

Поэтому $P_1 = P_{\text{ВХ}} + P_{\text{ВЫХ}}$.

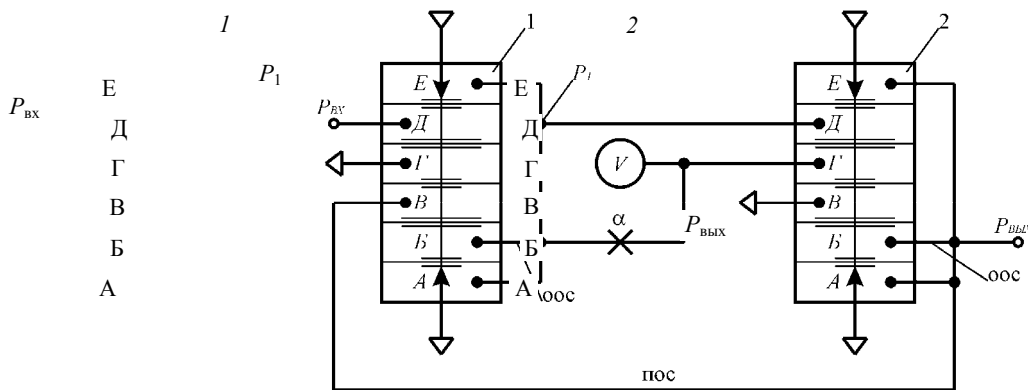


Рис. 3.2.9. Принципиальная пневматическая схема дифференцирующего устройства

Давления в камерах второго элемента сравнения

$$P_D = P_1; \quad \tau \frac{dP_\Gamma}{dt} + P_\Gamma = P_1; \quad P_B = 0; \quad P_Б = P_{\text{ВЫХ}}.$$

Поэтому $P_{\text{ВЫХ}} = \tau \frac{dP_{\text{ВХ}}}{dt}$ и $W(s) = \tau s$.

Таким образом, синтезированное устройство имеет заданную передаточную функцию.

Анализ работы устройства (рис. 3.2.9) показал, что оно определяет скорость изменения входного сигнала только в том случае, когда сигнал увеличивается.

Использовать в элементах пневмоавтоматики давление меньше чем атмосферное, т.е. вакуум, нецелесообразно, так как это значительно усложнит конструкции элементов. Проблема будет решена, если в устройстве в качестве нуля использовать некоторое избыточное давление, превышающее атмосферное давление. Технически это осуществляется подачей в камеру В второго пятимембранного элемента сравнения постоянного давления P_0 . Тогда выходной сигнал будет равен

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_0 + \tau \frac{dP_{\text{ВХ}}}{dt}. \quad (3.2.6)$$

Наличие давления P_0 позволяет получить как положительные, так и отрицательные значения производной от входного сигнала.

Типовые звенья систем автоматического регулирования, построенные на элементах пневмоавтоматики, приведены в прил. 9.

В пневмоавтоматике для создания потенциального выхода используется повторитель, который на своем выходе формирует давление, равное входному сигналу. В ряде случаев необходимо устройство, повторяющее расход газа. Такая проблема возникает, например, при реализации барботажного метода измерения плотности жидкости. Передаточная функция повторителя расхода имеет вид $W(s) = K$.

Для создания устройства повторения расхода газа следует использовать идеи построения устройств для измерения расхода газа.

Повторение расхода наиболее просто осуществить путем измерения расхода методом переменного перепада давлений и дальнейшего пропорционирования полученных результатов. Пусть по соответствующим дросселям с проводимостями β_1 и β_2 под действием перепадов давлений ΔP_1 и ΔP_2 протекает газ с расходами G_1 и G_2 (рис. 3.2.10). Тогда справедливы следующие зависимости:

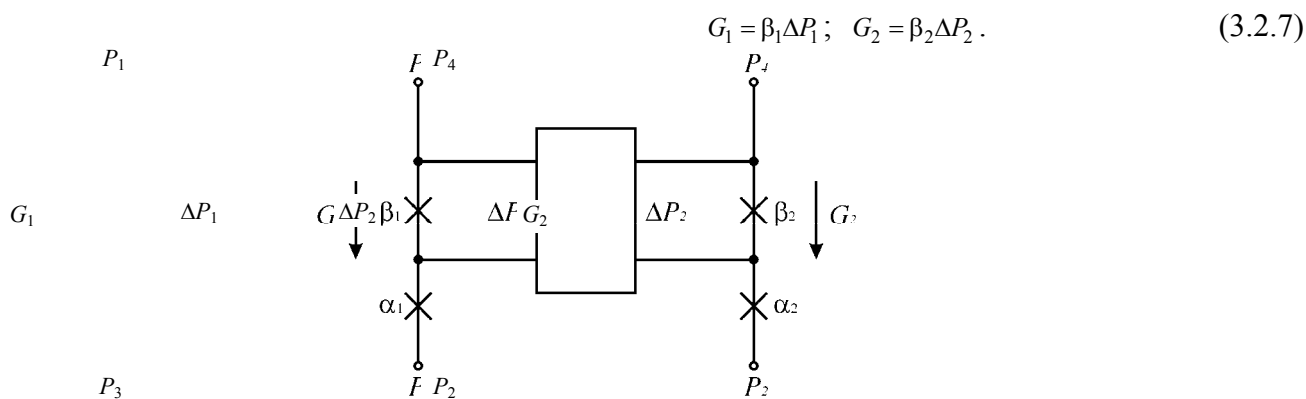


Рис. 3.2.10. Схема повторения расхода

При равенстве проводимостей и перепадов давлений выходной расход G_2 будет равен входному G_1 . Если проводимости не равны при сохранении равенства перепадов давлений, то выходной расход пропорционален входному:

$$G_2 = KG_1, \quad K = \beta_2 / \beta_1. \quad (3.2.8)$$

Повторитель расхода (рис. 3.2.11) построен на пятимембранном элементе сравнения I , включенном по схеме повторения давления, переменных 2 и 3 и постоянных 4 и 5 дросселях. Камеры Д и Г элемента I соединены соответственно с входом и выходом дросселя 2, причем дроссель 4 соединен с выходом дросселя 2 и с нагрузкой P_3 . Дроссели 3 и 5 соединены последовательно, при этом камеры Б и В элемента I соединены соответственно с входом дросселя 3 и междроссельной точкой. На входе дросселя 5 действует давление нагрузки P_2 . Входной расход G_1 создает на дросселе 2 перепад давлений ΔP_1 , под действием которого мембранный блок элемента I начинает опускаться. Давление P_4 на выходе элемента I возрастает, что приводит к изменению перепада давлений на дросселе 3, а, следовательно, и к росту выходного расхода G_2 . Условием равновесия мембранного блока элемента I является равенство нулю алгебраической суммы давлений $P_Д$, $P_Г$, $P_В$ и $P_Б$ в соответствующих камерах, т.е. $P_Д - P_Г + P_В - P_Б = 0$, из которого следует $\Delta P_1 = P_Д - P_Г = P_В - P_Б = \Delta P_2$.

Дополнительно, учитывая (3.2.7), получаем зависимость выходного расхода G_2 от входного G_1 в виде уравнения (3.2.8).

Таким образом, элемент I осуществляет повторение перепада давления ΔP_1 , т.е. $\Delta P_2 = \Delta P_1$.

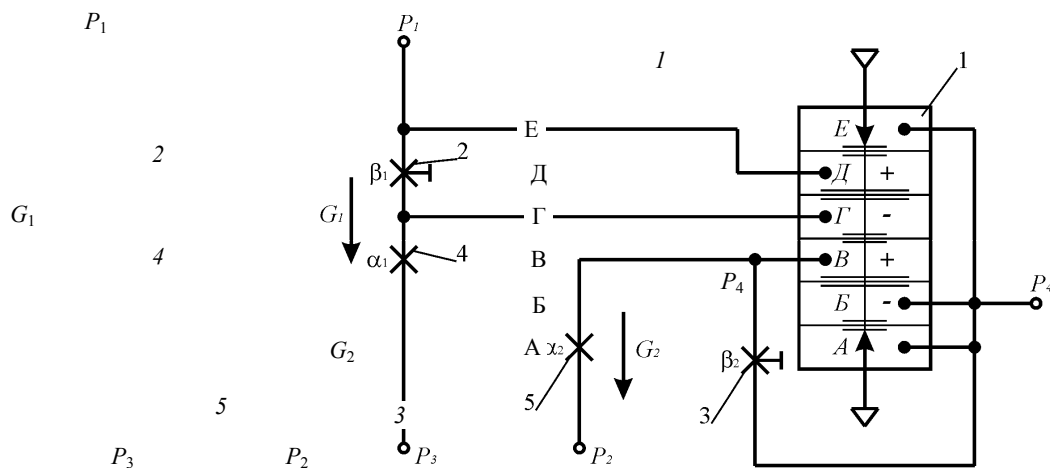


Рис. 3.2.11. Принципиальная схема повторителя расхода

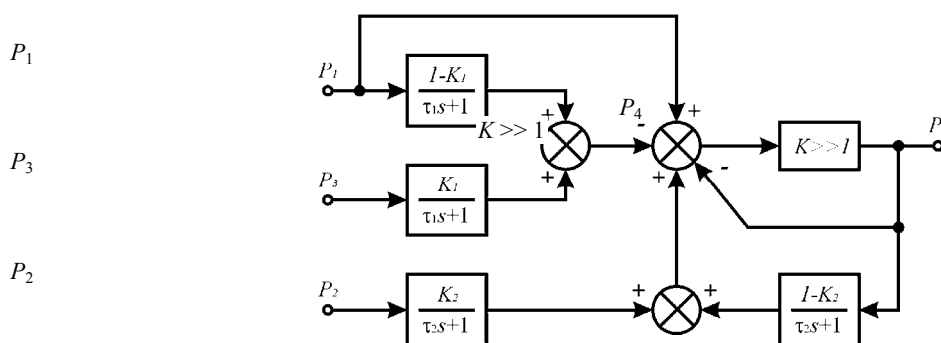


Рис. 3.2.12 Структурная схема повторителя расхода

Передаточная функция повторителя получена на основании структурной схемы (рис. 3.2.12), в которой элемент I представлен усилительным звеном с большим коэффициентом усиления K и сумматором, дроссели 2 и 4 и камера Γ элемента I , а также дроссели 3 и 5 и камера B элемента I представлены в виде последовательно соединенных соответствующих сумматоров и аperiodических звеньев.

Найденная зависимость давления P_4 от давлений P_1, P_2 и P_3 имеет вид:

$$P_4(s) = \frac{\tau_2 s + 1}{\tau_2 s + K_2} \left(\frac{\tau_1 s + K_1}{\tau_1 s + 1} P_1 + \frac{K_2}{\tau_2 s + 1} P_2 - \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} P_3 \right),$$

$$K_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \beta_i}, \quad \tau_i = \frac{V}{(\alpha_i + \beta_i) RT}, \quad i = 1, 2. \quad (3.2.9)$$

Положив давление нагрузки равными атмосферному, т.е. $P_2 = P_3 = 0$, можно утверждать, что в статическом режиме входной расход G_1 пропорционален избыточному давлению P_1 , а выходной расход G_2 – избыточному давлению P_4 . Эквивалентная проводимость γ_1 последовательного соединения дросселей 2 и 4, установленных во входной цепи, определяется из уравнения

$$\gamma_1 = \frac{\alpha_1 \beta_1}{\alpha_1 + \beta_1}. \quad (3.2.10)$$

Аналогично определяются эквивалентная проводимость γ_2 выходной цепи, составленной из последовательно соединенных дросселей 3 и 5:

$$\gamma_2 = \frac{\alpha_2 \beta_2}{\alpha_2 + \beta_2}. \quad (3.2.11)$$

Учитывая (3.2.9) – (3.2.11), из (3.2.8) получаем передаточную функцию $W(s)$ повторителя по расходу:

$$W(s) = \frac{\alpha_2 \beta_2 (\alpha_1 + \beta_1) (\tau_2 s + 1) (\tau_1 s + K_1)}{\alpha_1 \beta_1 (\alpha_2 + \beta_2) (\tau_2 s + K_2) (\tau_1 s + 1)}. \quad (3.2.12)$$

Описание статического режима работы повторителя, полученное по передаточной функции (3.2.12), совпадает с описанием этого режима, выведенного из принципа действия повторителя и представленного уравнением (3.2.8).

В ходе экспериментального исследования повторителя получена зависимость расхода G_2 от расхода G_1 при различных значениях проводимостей β_1 и β_2 дросселей 2 и 3 и нагрузок P_2 и P_3 . Экспериментальная установка (рис. 3.2.13) содержит задатчики давлений 6, 7, 8, пневматические емкости 9 и 10, образцовые манометры 11, 12, 13 и 14, измерители расхода 15 и 16. Емкости 9 и 10 и задатчики 7 и 8 имитируют входные емкости и давления нагрузок.

Определены значения расходов G_1 и G_2 при изменении давления P_1 на входе при постоянных проводимостях дросселей 2 и 3. При этом коэффициент передачи K является фиксированной величиной, новое значение которого устанавливается изменением проводимостей β_1 и β_2 .

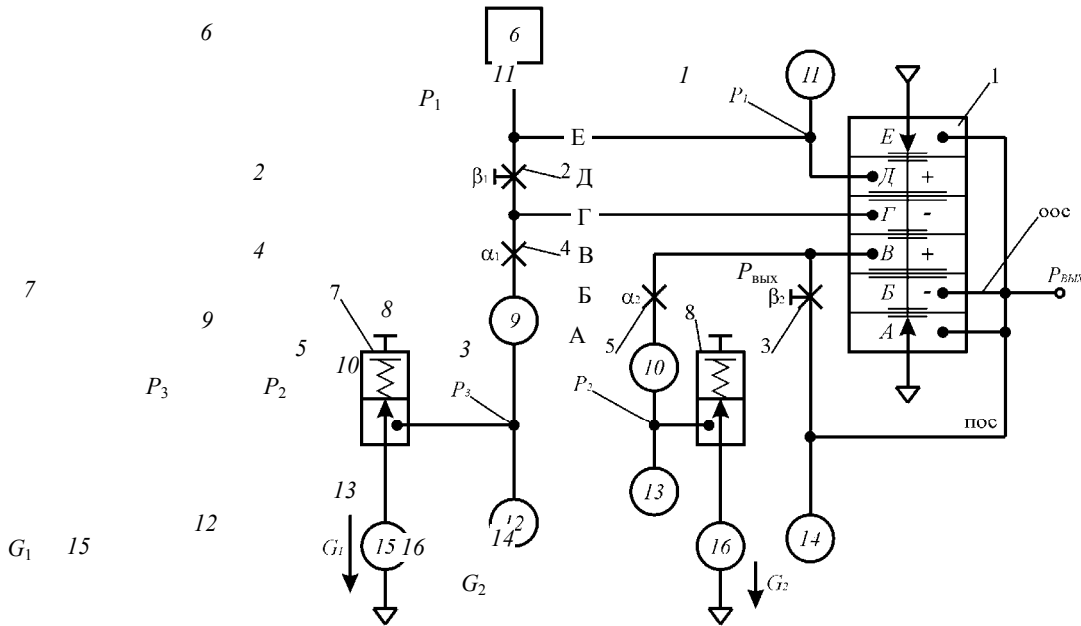


Рис. 3.2.13. Схема экспериментальной установки для исследования повторителя расхода:

- 1 – элемент сравнения П2ЭС.3; 2, 3 – переменные дроссели П2Д.2;
- 4, 5 – постоянные дроссели П2Д.4-1 и П2Д.4-2; 6 – задатчик П23Д.4;
- 7, 8 – задатчики П23Д.3; 9, 10 – емкости ПОЕ-50;
- 11, 12, 13, 14 – образцовые манометры;
- 15, 16 – газосчетчики барабанные ГСБ-400

Величины проводимостей дросселей 2 и 3 определялись экспериментально путем измерения времени заполнения пневмокамеры до заданной величины давления P_K при подаче на ее вход известного давления P_0 . При определенном соотношении величин давлений P_K/P_0 измеренное время является постоянной времени апериодического звена, из которого вычисляется значение проводимости.

Теоретические и экспериментальные статические характеристики повторителя приведены на рис. 3.2.14. Рабочий диапазон изменения входных давлений элемента сравнения в соответствии с техническими характеристиками элементов УСЭППА составляет 0,02...0,10 МПа, что накладывает ограничения на перепады давлений, определяющих расходы G_1 и G_2 . С учетом указанного ограничения определены диапазоны изменения расходов. Эти диапазоны имеют следующие величины: $G_1 = (2...13) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ и $G_1 = (0,86...4,3) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

$G_2 \cdot 10^4, \text{ м}^3/\text{с}$ $K = 1,3$ 0,9 0,74 0,44

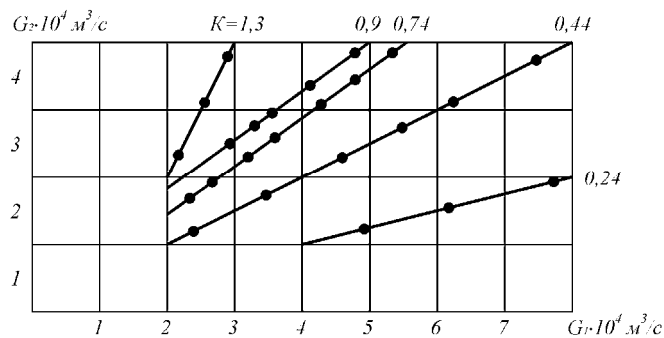


Рис. 3.2.14. Статические характеристики повторителя расхода:

— — теоретические; • — экспериментальные данные

При таких диапазонах изменения расходов коэффициент передачи K может изменяться от 0,07 до 1,8.

В ходе эксперимента установлено, что изменение давлений P_1 , P_4 и нагрузок в диапазоне 0...0,6 МПа не влияет на точность работы повторителя. Анализ источников погрешностей и сравнение теоретических и экспериментальных статических характеристик показали, что пропорционирование расхода осуществляется с погрешностью не превышающей 4 %.

Результаты исследований повторителя расхода подтверждают работоспособность предложенной конструкции и ее удовлетворительные метрологические свойства. Повторитель расхода рассмотренной конструкции может быть использован в пневмометрических первичных измерительных преобразователях различных технологических параметров.

3.3. СИНТЕЗ АНАЛОГО-ДИСКРЕТНЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПО ЗАДАННОМУ КАЧЕСТВУ ПРОТЕКАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Наряду с синтезом устройств автоматики, осуществляемым по заданным статическим характеристикам или передаточным функциям, который рассмотрен ранее, существует синтез устройств по критерию, который определяется самим ходом протекания технологического процесса.

Рассмотрим синтез пневматических устройств, которые функционируют в составе автоматической системы регулирования (АСР). В таком случае критерий, по которому происходит синтез, определяется заданным качеством протекания технологического процесса.

3.3.1. Стабилизация технологического параметра объекта, обладающего большим транспортным запаздыванием

Одноконтурные АСР хорошо зарекомендовали себя при автоматизации технологических процессов, в которых необходимо стабилизировать отдельные параметры технологических объектов. Качество работы таких систем определяется точностью измерения выходного сигнала объекта и реализации заданного закона регулирования, а также точностью отработки исполнительным устройством управляющего сигнала.

Во многих случаях технологический объект управления можно представить в виде последовательно соединенных типовых звеньев: усилительного, апериодического и запаздывающего. Тогда передаточная функция объекта запишется в виде

$$W_{об}(s) = \frac{K}{\tau_1 s + 1} e^{-\tau_2 s}.$$

Типы регулятора выбирают по отношению постоянных времени τ_2/τ_1 . При $\tau_2/\tau_1 < 0,2$ рекомендуется позиционный закон регулирования; $\tau_2/\tau_1 < 1$ — непрерывный; $\tau_2/\tau_1 > 1$ — непрерывный или импульсный; $\tau_2/\tau_1 \gg 1$ — сложный закон регулирования, компенсирующий запаздывание [8].

В данном параграфе будем рассматривать АСР, в которой объект имеет переходную функцию, представленную на рис. 3.3.1, причем $\tau_2/\tau_1 \gg 1$.

Положим, что данная АСР (рис. 3.3.2) стабилизирует температуру $y(t)$ продукта на выходе из объекта 1 изменением расхода $x(t)$ подаваемого пара. Датчик 2 измеряет текущее значение температуры

продукта $y(t)$ и подает сигнал P_{II} через вторичный прибор 3 на вход "переменная" регулятора 4, на вход "задание" которого с вторичного прибора 3 подается сигнал P_3 .

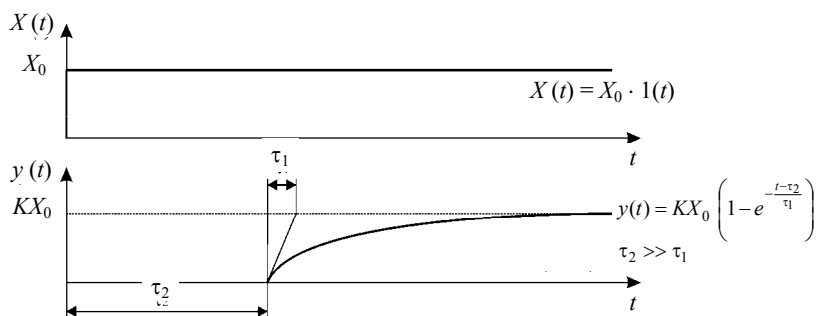


Рис. 3.3.1. Переходная функция объекта

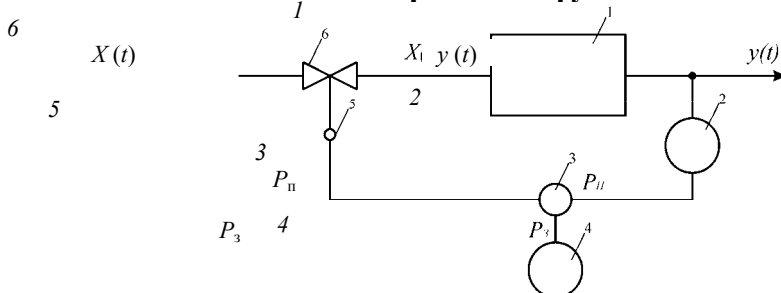


Рис. 3.3.2. Структурная схема АСР:

1 – объект; 2 – датчик; 3 – вторичный прибор; 4 – регулятор;
5 – исполнительный механизм; 6 – регулирующий орган;
 P_{II} – переменная; P_3 – задание

Рассмотрим случай, когда в первоначальный момент времени температура продукта меньше заданной, т.е. $P_{II} < P_3$. Регулятор 4, в соответствии с заданным законом регулирования (например, П, ПИ, ПИД), по разности $P_{II} - P_3$ формирует управляющий сигнал, поступающий на исполнительный механизм 5, который, с помощью регулирующего органа 6, начинает увеличивать расход пара. На объект 1 поступает все возрастающее количество пара, но, вследствие запаздывания, текущее значение температуры продукта не достигает заданного значения за промежуток времени, в течение которого исполнительный механизм 5 успеет полностью открыть регулирующий орган 6.

Температура продукта начинает увеличиваться, достигает заданного значения и продолжает увеличиваться. Регулятор 4 по разности $P_3 - P_{II}$ формирует управляющий сигнал на закрытие регулирующего органа 6. Вследствие запаздывания объекта 1 регулирующий орган 6 полностью закрывается.

Таким образом, в АСР, с непрерывным законом регулирования и объектом с большим запаздыванием, регулирующий орган перемещается из одного крайнего положения в другое, а выходной сигнал объекта колеблется в широком диапазоне, т.е. не происходит стабилизации выходного сигнала.

3.3.2. Формирование закона регулирования, учитывающего запаздывание объекта

Рассмотрев работу АСР, в состав которой входит регулятор, реализующий некоторый непрерывный закон регулирования, с объектом, обладающим большим временем запаздывания, выяснили, что такая система не обеспечивает требуемого качества протекания технологического процесса.

Регулятор успевает перевести регулирующий орган в крайнее положение потому, что объект некоторый интервал времени "не чувствует" изменения входного сигнала (рис. 3.3.3, а).

Как модернизировать непрерывный закон регулирования, чтобы он учитывал большое запаздывание объекта?

Необходимо воздействовать на объект и обязательно дождаться момента, когда выходной сигнал изменится в соответствии со статической характеристикой объекта (рис. 3.3.3, б).

P
 P_1 P_3 P_{II}

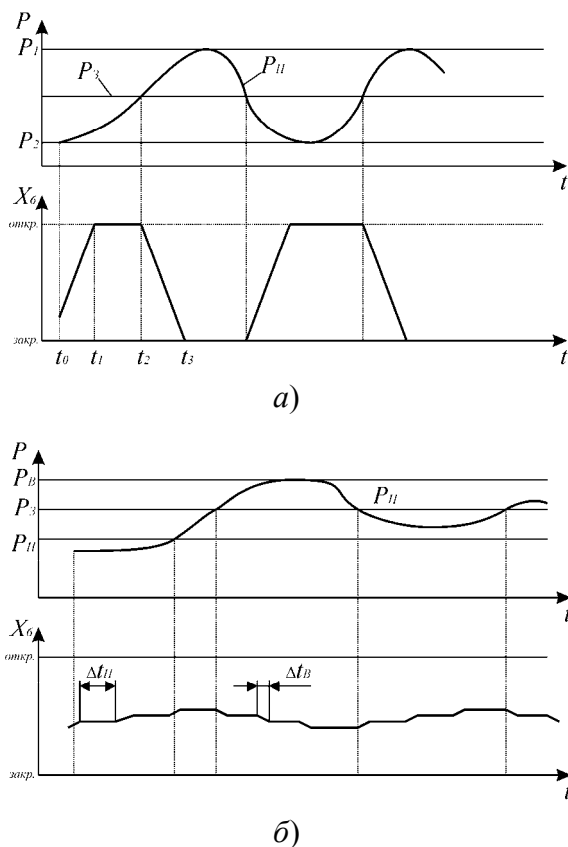


Рис. 3.3.3. Изменения значения температуры продукта и положения затвора регулирующего органа во времени:

a – для АСР с непрерывным законом регулирования;

б – для АСР с прерывистым законом регулирования;

P_{II} – переменная; P_3 – задание;

X_6 – положение затвора регулирующего органа;

$\Delta t_{в}$ – интервал времени воздействия; $\Delta t_{п}$ – интервал времени паузы

В первоначальный момент времени текущее значение переменной $P_{II}(t_0)$ меньше заданного P_3 . Регулирующий орган начинает увеличивать расход пара, поступающего в объект. В момент времени t_1 регулирующий орган полностью открывается. Переменная P_{II} с возрастающей скоростью стремится к заданию P_3 . В момент времени t_2 наступает равенство $P_{II} = P_3$, но переменная P_{II} продолжает возрастать, так как на объект поступает большое количество тепла. В интервале времени (t_2, t_3) регулирующий орган уменьшает расход пара от максимального значения до нуля.

Предлагается усложнить непрерывный закон регулирования введением интервала паузы $\Delta t_{п}$, в течение которого не изменяется положение затвора регулирующего органа, т.е. в этом интервале времени на объект подается постоянный расход пара.

Таким образом, в один интервал времени $\Delta t_{в}$ регулятор воздействует на объект, т.е. изменяет по заданному закону расход пара, а в другой интервал времени $\Delta t_{п}$ регулятор не изменяет расход пара. За интервал паузы $\Delta t_{п} > \tau_2$ выходной сигнал объекта примет значение, соответствующее статической характеристике объекта.

Закон изменения положения затвора X_6 регулирующего органа определяется разностью $P_{II} - P_3$ и непрерывным законом регулирования, обрабатываемым регулятором. Поэтому, чем ближе переменная находится к заданию, тем меньше воздействие регулятора на объект. Вследствие этого переменная P_{II} возрастает по сравнению с P_3 на меньшую величину.

3.3.3. СИНТЕЗ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРЕРЫВИСТОГО РЕГУЛЯТОРА

Необходимо разработать схему регулятора, реализующего прерывистый закон регулирования, который описан в предыдущем параграфе. Искомый регулятор построим на базе ПИ регулятора, выходной сигнал $P_{ВЫХ}$ которого формируется по следующему закону:

$$P_{\text{вых}} = K(P_{\text{п}} - P_3) + \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int (P_{\text{п}} - P_3) dt .$$

Выходной сигнал регулятора $P_{\text{вых}}$ будет постоянным, если постоянными будут величины $P_{\text{п}}$, P_3 , K , $\tau_{\text{и}}$. Это будет в том случае, если в интервал времени паузы $\Delta t_{\text{п}}$ по каналу регулятора "переменная" подать давление задания P_3 (рис. 3.3.4).

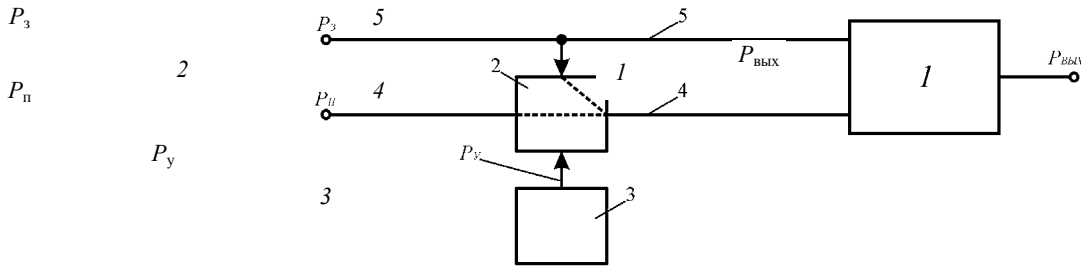


Рис. 3.3.4. Структурная схема пневматического прерывистого регулятора:

I – пропорционально-интегральный регулирующий блок; 2 – переключающий блок; 3 – управляющий блок; 4 – канал регулятора "переменная";
 5 – канал регулятора "задание"

По команде управляющего блока 3 $P_y = 0$ переключающий блок 2 подключает давление $P_{\text{п}}$ к каналу 4 "переменная" и блок 1 обрабатывает ПИ закон регулирования. По команде $P_y = 1$ переключающий блок 2 подключает давление P_3 к каналу 4 "переменная". Поэтому выходное давление $P_{\text{вых}}$ не изменяется.

Таким образом, подавая в канал "переменная" то давление $P_{\text{п}}$, то давление P_3 , можно реализовать прерывистый закон регулирования.

В качестве управляющего блока 3 возможно использовать генератор прямоугольных импульсов с изменяемыми интервалами единичного и нулевого импульсов. Переключающий блок выполним на трехмембранном реле (рис. 3.3.5).

На реле 2 собран переключающий блок, на элементах $3 - 7$ собран генератор прямоугольных импульсов. Под действием подпора ($P_{\text{под}}$) в камере В мембранный блок реле 3 опускается вниз. На выход поступает давление питания. Под действием сигнала $P_y = 1$ мембранный блок реле 2 опускается вниз и давление задания P_3 через открытое сопло в камере Г поступает в канал "переменная" регулятора. Выходной сигнал $P_{\text{вых}}$ не изменяется. Одновременно сигнал $P_y = 1$ опускает вниз мембранный блок реле 4 и через дроссель 6 начинает заполнять емкость 5 . При достижении давления в емкости 5 величины срабатывания реле 3 $\left(P_{\text{под}} + P_{\text{пит}} \frac{f}{F-f} \right)$ мембранный блок реле 3 поднимается вверх, давление P_y через открытое сопло в камере А сбрасывается в атмосферу.

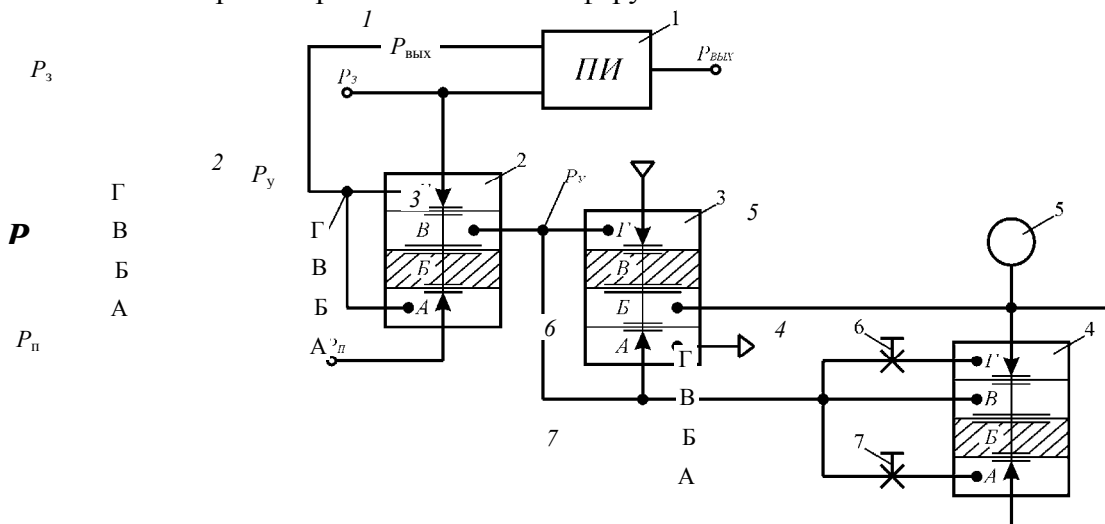


Рис. 3.3.5. Схема пневматического прерывистого регулятора:

1 – пропорционально-интегральный блок; 2, 3, 4 – трехмембранные реле;
5 – емкость; 6, 7 – переменные дроссели

Под действием подпора в камере Б реле 2 мембранный блок поднимается вверх, и давление $P_{\text{п}}$ поступает в канал "переменная" регулятора. Блок 1 обрабатывает ПИ закон регулирования.

Емкость 5 через открытое сопло в камере А реле 4 и через дроссель 7 начинает разряжаться в атмосферу через открытое сопло в камере А реле 3. Как только давление в камере Б реле 3 станет чуть меньше давления подпора ($P_{\text{под}}$) мембранный блок реле 3 опустится вниз и опять на выходе генератора появится единичный импульс $P_y = 1$.

Таким образом, дросселем 6 настраивается интервал времени, в течение которого выходной сигнал регулятора не изменяется, т.е. регулятор "ожидает" время запаздывания объекта; дросселем 7 настраивается интервал времени, в течение которого регулятор обрабатывает ПИ закон регулирования.

Проведем анализ синтезированного прерывистого регулятора. В регуляторе (рис. 3.3.5) интервалы активного воздействия регулятора постоянны и выставляются в ручную. Для улучшения качества работы АСР необходимо величину этого интервала изменять пропорционально разности $P_{\text{п}} - P_3$. Чем больше эта разность, тем дальше объект находится от заданного состояния. Поэтому необходимо больше времени воздействовать на объект.

Реализация этого алгоритма позволяет повысить качество регулирования за счет более быстрого наступления равенства $P_{\text{п}} = P_3$. При отклонении текущего значения выходного сигнала объекта $P_{\text{п}}$ от заданного значения P_3 регулятор вычисляет величину интервала времени интенсивного воздействия на объект. Чем дольше находится объект от заданного значения, тем больше регулятор должен воздействовать на него. По мере приближения переменной $P_{\text{п}}$ к заданию P_3 величина интервала воздействия приближается к своему номинальному значению.

Структурная схема регулятора (рис. 3.3.6) должна дополнительно содержать блоки определения разности $P_{\text{п}} - P_3$ и изменения длительности импульса. Рассмотрим реализацию блока разности на пневматических элементах. Знакочувствительный узел при одном входном сигнале невозможно реализовать на пневматических элементах. Это объясняется тем фактом, что входная величина ΔP принимает положительные и отрицательные значения. При $\Delta P > 0$ достаточно просто создать на пневматических элементах блок, реализующий формулу $\Delta P = P_{\text{п}} - P_3$.

Если $\Delta P < 0$, то на тот же вход элемента поступает отрицательное давление, т.е. вакуум. Все разработанные и выпускаемые пневматические элементы работают на избыточном давлении.

Известно, что разработка и изготовление пневматических элементов, работающих одновременно на вакууме и избыточном давлении, весьма сложна и мало перспективна.

Таким образом, необходимо разработать разностную схему, имеющую два выхода, причем на первом выходе должен появиться сигнал при $P_{\text{п}} > P_3$. На втором выходе появляется сигнал $P_3 - P_{\text{п}}$ при $P_3 > P_{\text{п}}$. За основу схемы возьмем пятимембранный элемент сравнения.

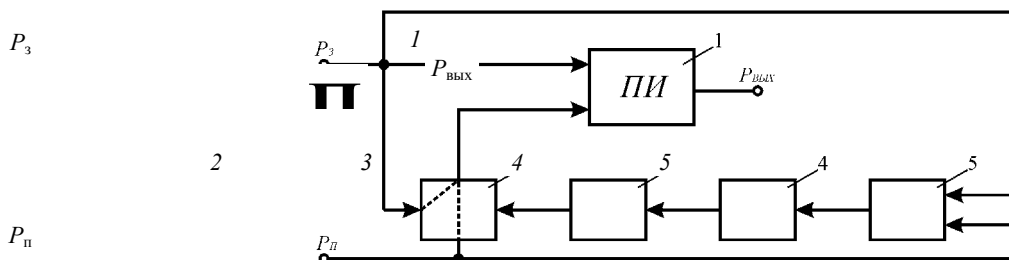


Рис. 3.3.6. Структурная схема пневматического прерывистого регулятора с подстройкой:

1 – пропорционально-интегральный блок; 2 – переключающий блок;
3 – генератор управляемых импульсов; 4 – блок, изменяющий длительность импульса; 5 – блок определения разности $P_{\text{п}} - P_3$

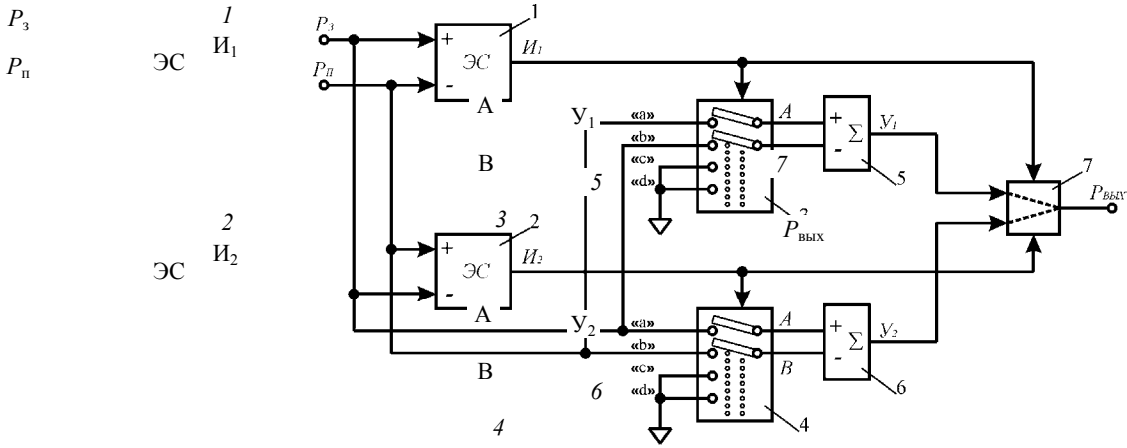


Рис. 3.3.7. Структурная схема блока разности:
 1, 2 – элементы сравнения; 3, 4 – ключи; 5, 6 – сумматоры; 7 – ключ

Элементы сравнения 1 и 2 (рис. 3.3.7) формируют выходные сигналы I_1 и I_2 по следующему закону:

$$I_1 = \begin{cases} 1, & P_3 > P_n; \\ 0, & P_3 < P_n, \end{cases} \quad I_2 = \begin{cases} 1, & P_n > P_3; \\ 0, & P_n < P_3. \end{cases}$$

Ключ 3 при $I_1 = 0$ соединяет вход "a" с выходом А и вход "b" с выходом В, а при $I_1 = 1$ соединяет вход "c" с выходом А, вход "d" с выходом В. Аналогично ключ 4 при $I_2 = 0$ соединяет вход "a" с выходом А и вход "b" с выходом В, а при $I_2 = 1$ соединяет вход "c" с выходом А и вход "d" с выходом В. Поэтому выходные сигналы Y_1 и Y_2 сумматоров 5 и 6 имеют следующий вид:

$$Y_1 = \begin{cases} P_n - P_3 & \text{при } I_1 = 0, \quad P_n > P_3; \\ 0 & \text{при } I_1 = 1, \quad P_n < P_3, \end{cases}$$

$$Y_2 = \begin{cases} P_3 - P_n & \text{при } I_2 = 0, \quad P_n < P_3; \\ 0 & \text{при } I_2 = 1, \quad P_n > P_3. \end{cases}$$

Ключ 7 при $I_1 = 0$ соединяет канал Y_1 с выходным каналом, а при $I_2 = 0$ – канал Y_2 с выходным каналом.

Таким образом, для выходного сигнала $P_{\text{вых}}$ блока разности справедливы следующие формулы

$$P_{\text{вых}} = \begin{cases} Y_1 = P_n - P_3 & \text{при } I_1 = 0, \quad I_2 = 1, \quad P_n > P_3; \\ Y_2 = P_3 - P_n & \text{при } I_1 = 1, \quad I_2 = 0, \quad P_n < P_3. \end{cases} \quad (3.3.1)$$

Приступим к разработке принципиальной схемы блока разности на основе структурной схемы. Элементы сравнения 1 и 2 просто реализовать на трехмембранных элементах сравнения, включенных без обратных связей. Сумматоры 5 и 6 реализуются на пятимембранных элементах сравнения, включенных с обратной связью. Ключ 7 возможно реализовать на четырех трехмембранных реле (рис. 3.3.8).

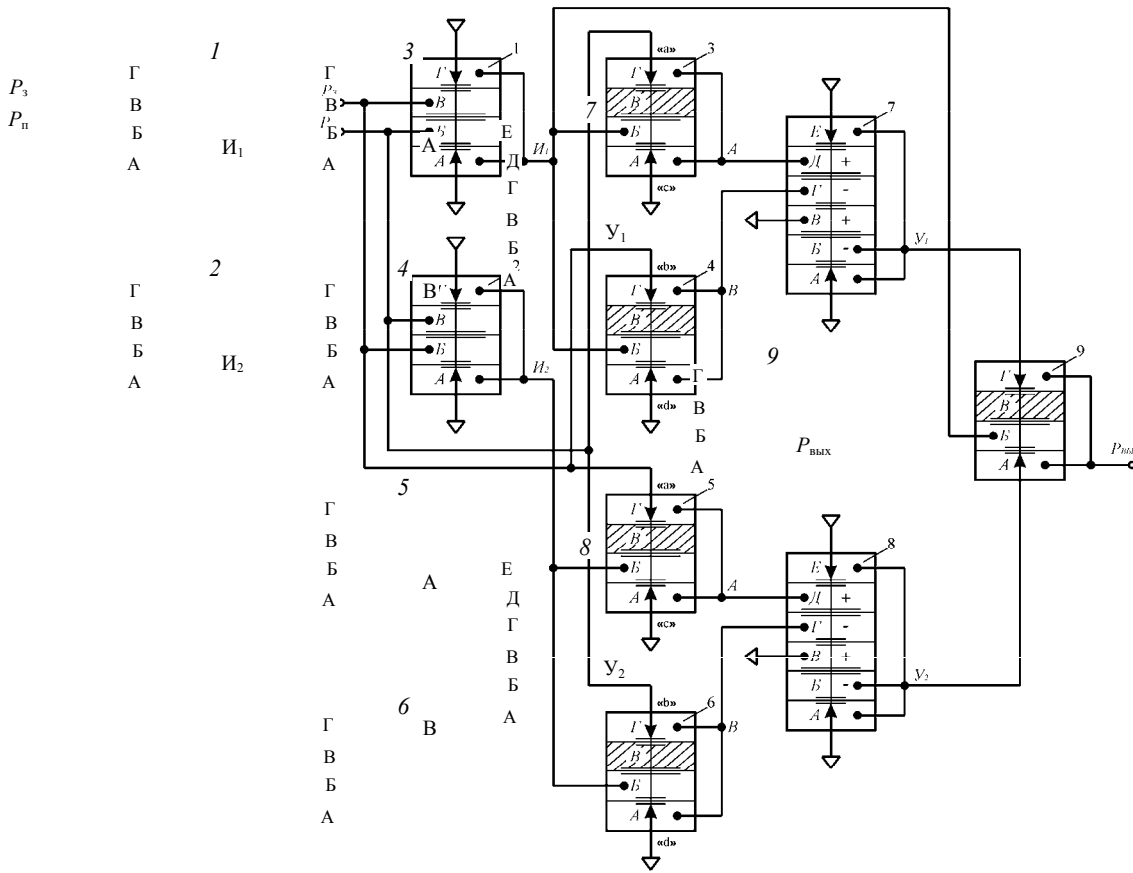


Рис. 3.3.8. Принципиальная схема блока разности:

I, 2 – трехмембранные элементы сравнения; 3, 4, 5, 6, 9 – трехмембранные реле; 7, 8 – пятимембранные элементы сравнения

Попытаемся упростить схему блока разности (рис. 3.3.8). Заметим, что основой блока являются пятимембранные элементы сравнения, так как они определяют искомую разность входных сигналов. Реле 9 служит для коммутации выходного канала или с выходом Y_1 или с выходом Y_2 . Это реле работает в паре с элементом сравнения *I*, выходной сигнал которого осуществляет процесс коммутации.

Рассмотрим структурную схему блока, в которой оставим элементы *I*, 7, 8 и 9 (рис. 3.3.9).

Выходной сигнал схемы $P_{\text{вых}}$ определяется формулой

$$P_{\text{вых}} = \begin{cases} Y_1 = P_{\text{н}} - P_3, & P_{\text{н}} > P_3; \\ Y_2 = P_3 - P_{\text{н}}, & P_{\text{н}} < P_3. \end{cases}$$

Получили ту же формулу как и раньше (3.3.1). Таким образом, упрощенная схема блока выполняет поставленную задачу.

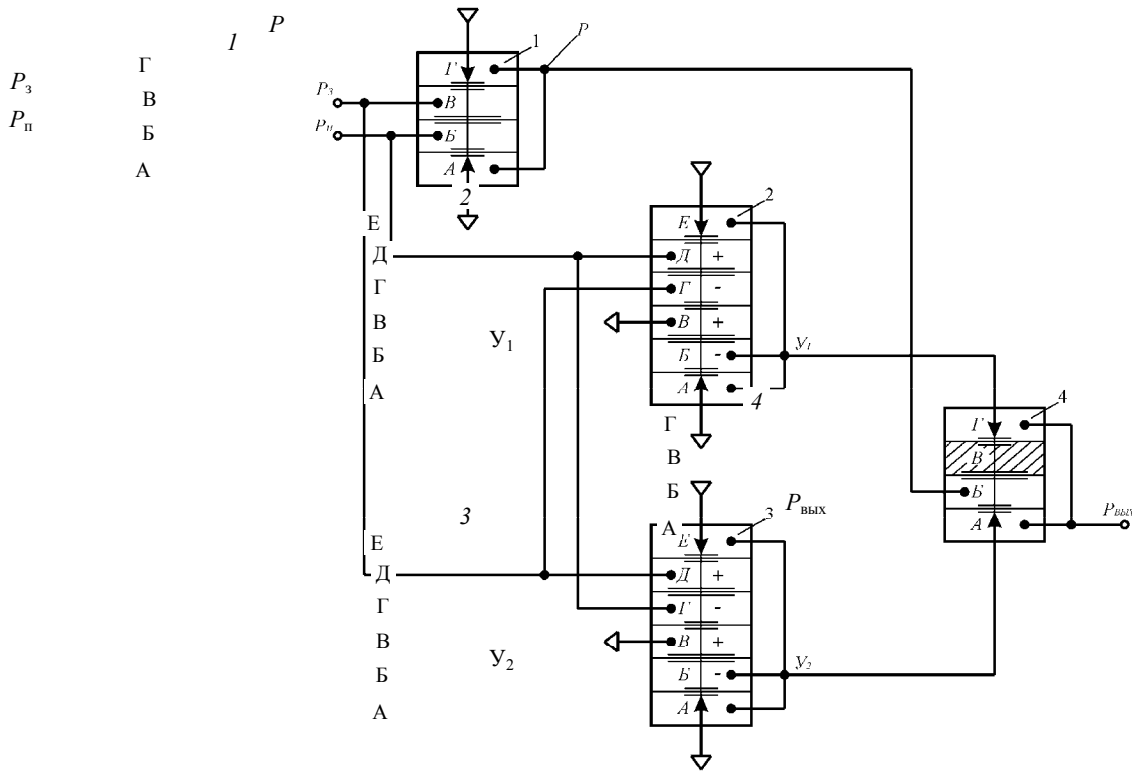


Рис. 3.3.9. Принципиальная схема блока разности

Проведем дальнейший анализ полученной схемы с целью сокращения элементов. Реле 4 служит для коммутации каналов Y_1 и Y_2 с каналом $P_{\text{вых}}$. Предположим, что в качестве командного сигнала использовать давления Y_1 и Y_2 . Трехмембранное реле не предназначено для сравнения двух аналоговых сигналов. Поэтому используем трехмембранный элемент сравнения. Тогда не нужны будут элемент 1 и реле 4.

Объединим два элемента сравнения 2 и 3 в один элемент, который должен иметь два независимых выхода. Это будет возможным, если применим сопловое включение питания. Рассмотрим полученную схему (рис. 3.3.10). Для получения разности входных сигналов в схеме элемента должна быть отрицательная обратная связь по каждому выходу.

Рассмотрим случай, когда $P_3 > P_n$. Мембранный блок элемента 1 начинает подниматься вверх. Проводимость сопла в камере Е уменьшается, а в камере А – увеличивается. Давление в междроссельной камере Ж увеличивается, а в точке К – уменьшается. Давление Y_1 в камере Д создает силу, препятствующую перемещению вверх мембранного блока. Поэтому можно утверждать, что в камере Д имеется отрицательная обратная связь. Равновесие мембранного блока наступит в тот момент, когда давление на первом выходе Y_1 не станет равным разности $P_3 - P_n$. В этот момент времени давление Y_2 в междроссельной камере К станет равным нулю. Давление $Y_1 = P_3 - P_n$ опустит мембранный блок элемента 2 и через сопло в камере Г пойдет на выход, т.е. $P_{\text{вых}} = Y_1 = P_3 - P_n$.

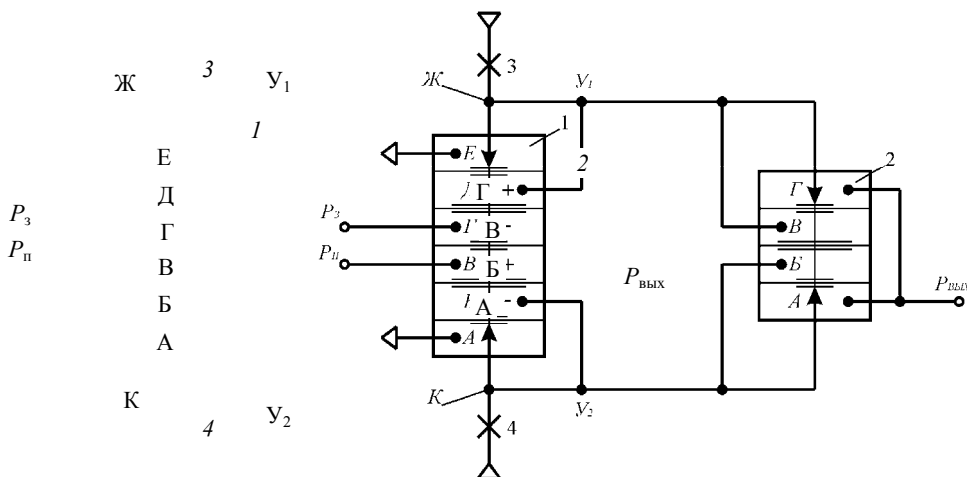


Рис. 3.3.10. Принципиальная схема блока разности:

1 – пятимембранный элемент сравнения;

2 – трехмембранный элемент сравнения; 3, 4 – дроссели

При $P_3 < P_n$ мембранный блок элемента 1 начинает опускаться вниз. Проводимость сопла в камере А уменьшается. Поэтому меньше воздуха будет выходить через это сопло в камеру А и сбрасываться в атмосферу. Давление Y_2 повышается. Равновесие мембранного блока наступит в тот момент, когда $Y_2 = P_3 - P_n$. В этот момент давление $Y_1 = 0$. Выходное давление Y_2 вновь заводится во входную камеру Б, т.е. в этой камере функционирует обратная связь. Давление Y_2 в камере Б стремится поднять мембранный блок вверх, мешает опускаться вниз, т.е. обратная связь действует на мембранный блок не так как выходной сигнал P_n , мешает ему перемещать мембранный блок. Поэтому в камере Б присутствует отрицательная обратная связь.

Выходной сигнал имеет следующие значения:

$$P_{\text{вых}} = \begin{cases} Y_1 = P_3 - P_n, & P_3 > P_n; \\ Y_2 = P_n - P_3, & P_3 < P_n. \end{cases}$$

Таким образом существенно упростили схему, синтезированную в начале исследования.

Перейдем к синтезу блока изменяющейся длительности импульса. В предыдущей схеме изменение времени длительности производилось изменением проводимости дросселя в ручном режиме. В данном случае необходимо изменять проводимость дросселя дистанционно под действием давления. Известна схема дросселя, построенная на сопле мембранного элемента (рис. 3.3.11). Управляющее давление поступает в одну из камер и начинает перемещать мембранный блок.

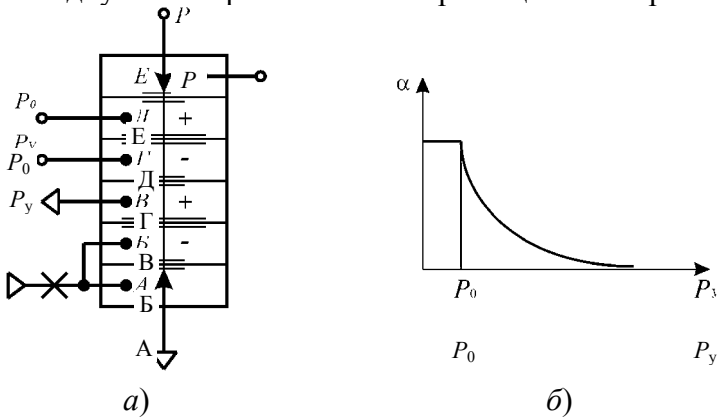


Рис. 3.3.11. Схема (а) и статическая характеристика (б) дросселя с изменяемой проводимостью в зависимости от давления

Поэтому проводимость сопла существенно изменяется. Для того, чтобы была пропорциональная зависимость между управляющим давлением и проводимостью сопла, необходима отрицательная обратная связь.

В начальный момент времени $P_y = 0$. Под действием давления P_0 мембранный блок начинает перемещаться вниз. Проводимость сопла в камере А уменьшается. Поэтому меньше давления из камеры Б сбрасывается в атмосферу. Давление в камере Б растет до тех пор, пока оно не уравнивает силу, созданную давлением P_0 . Тогда мембранный блок остановится. Проводимость сопла в камере Е будет иметь максимальное значение. Пусть давление P_y возрастет и примет постоянное значение. Мембранный блок начинает подниматься вверх. Проводимость сопла в камере Е уменьшается. Давление в камере Б отрицательной обратной связи остановит мембранный блок. Проводимость сопла в камере Е примет определенное значение. Возрастание управляющего давления P_y приводит к уменьшению проводимости сопла в камере Е (рис. 3.3.11, б).

Характер работы пропорционально-интегрального блока 1 можно разбить на два вида (рис. 3.3.12).

При подаче давления P_n на его вход "переменная" (интервал активного воздействия τ_a) блок 1 обрабатывает ПИ закон регулирования. В течение интервала ожидания τ_0 на его вход "переменная" подается давление P_3 . В этом случае выходной сигнал $P_{\text{вых}}$ не изменяется.

Поочередное подключение давлений P_n и P_3 к входу "переменная" блока 1 осуществляет блок 2 согласно управляющим импульсам P_y , создаваемым генератором 3. Импульс $P_y = 1$ подключает давление P_3 к входу "переменная" блока 1. Одновременно начинает заполняться емкость V через дроссель β_1 .

При достижении давления в этой емкости давления срабатывания реле генератора 3 на его выходе формируется импульс $P_y = 0$, который с помощью блока 2 подключает давление P_{II} к входу "переменная" блока 1. Емкость V начинает опустошаться через дроссели β_2 и сопло-заслонку, находящуюся в камере Е пятимембранного элемента сравнения блока 4.

Величина проводимости дросселя сопло-заслонка зависит от давления P_3 . Блок 5 формирует свой выходной сигнал P_5 следующим образом

$$P_5 = \begin{cases} P_{II} - P_3, & P_{II} > P_3; \\ P_3 - P_3, & P_{II} < P_3. \end{cases}$$

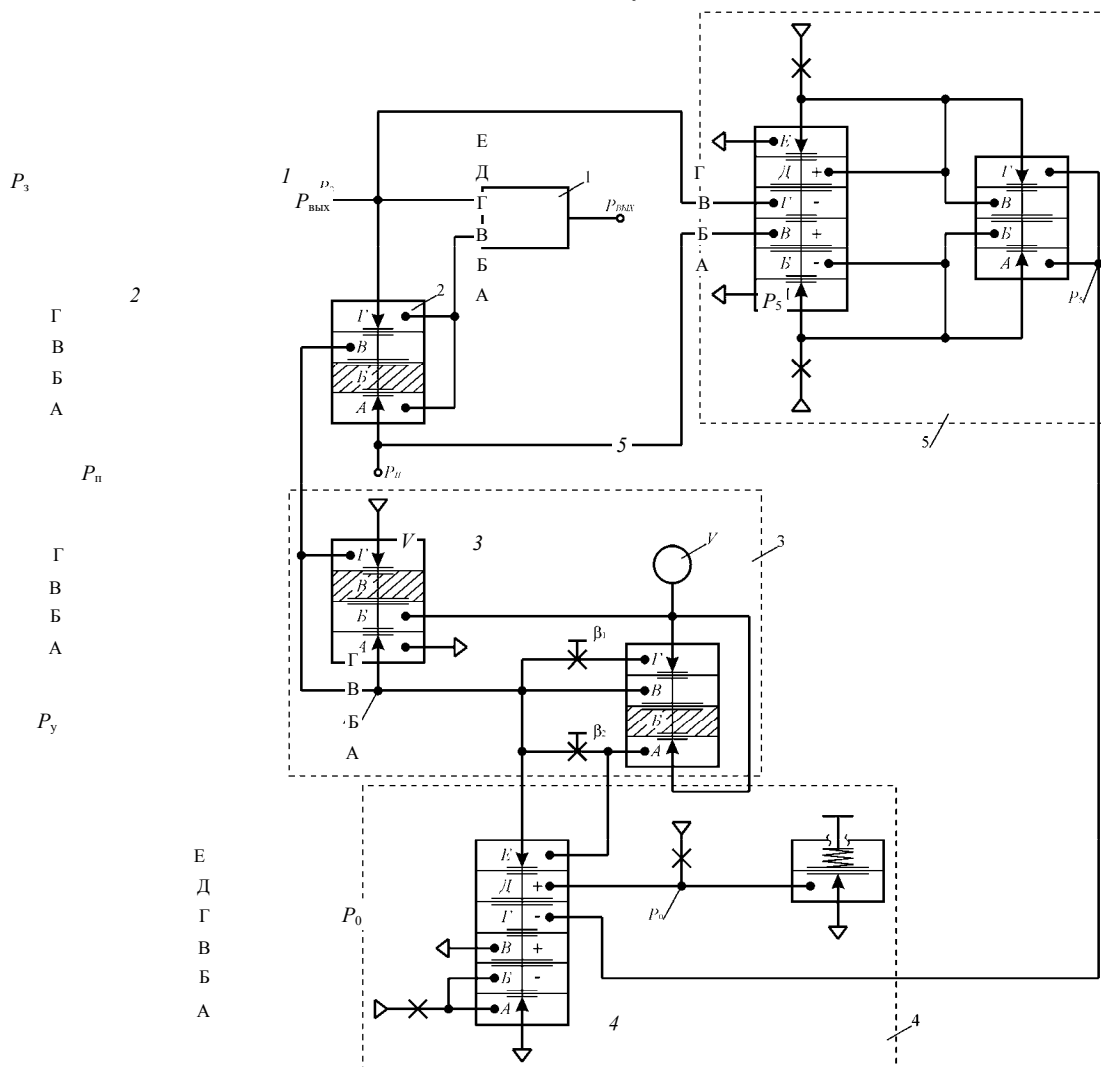


Рис. 3.3.12. Принципиальная схема пневматического прерывистого регулятора с подстройкой:

- 1 – пропорционально-интегральный блок;
- 2 – переключающий блок;
- 3 – генератор управляемых импульсов;
- 4 – блок, изменяющий длительность импульса;
- 5 – блок определения разности $P_{II} - P_3$

Чем дальше объект регулирования находится от заданного значения (разность $P_{II} - P_3$ велика), тем меньше проводимость дросселя сопло-заслонка. Поэтому больше времени происходит опустошение емкости V , т.е. больше интервал времени воздействия Δt_v .

Блок 1 изменяет свой выходной сигнал $P_{ВЫХ}$, тем самым в большей степени воздействует на объект, направляя его к заданному значению.

Регулятор изменяет величину интервала активного воздействия на объект в зависимости от величины разности $P_{II} - P_3$.

Таким образом, синтезированный регулятор более точно стабилизирует технологический параметр объекта, обладающего большим запаздыванием. Синтезированные пневматические устройства приведены в прил. 10.

3.4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

1. Какие обратные связи имеются в устройствах, изображенных на рис. гл. 3?
2. Как составляются структурные схемы по исходной принципиальной схеме (рис. гл. 3)?
3. Как формулируется выходной сигнал в элементах сравнения (рис. 3.1.1 – 3.1.5)?
4. Чем отличается задача анализа автоматического устройства от задачи синтеза?
5. Как реализуется умножение входного давления на коэффициент меньше единицы?
6. Как реализуется умножение входного давления на коэффициент больше единицы?
7. Как реализуется сложение двух входных давлений?
8. Какие процессы в технике можно математически описать как процесс интегрирования?
9. Какими уравнениями описываются связи элементов в устройствах (рис. гл. 3)?
10. Какими уравнениями описываются процессы, происходящие в элементах устройств (рис. гл. 3)?
11. Как определяется размерность величин, входящих в формулы (3.1.1) – (3.1.5), (3.2.1) – (3.2.15), (3.3.1) – (3.3.2)?
12. Какие принимаются допущения при определении зависимости скорости изменения количества газа в емкости от расхода газа через дроссель?
13. С какой целью в устройстве (рис. 3.2.3) введена положительная обратная связь?
14. При каких условиях справедливо описание состояния газа в емкости, входящей в состав интегрирующего звена, уравнением Менделеева-Клапейрона?
15. Какие Вы знаете примеры использования в технике интегрирующего звена?
16. Какие Вы знаете примеры использования в технике дифференцирующего звена?
17. В каких случаях в устройствах автоматики используется потенциальный выход?
18. Каким способом уменьшили влияние методической погрешности в устройстве (рис. 3.2.7)?
19. С какой целью в дифференцирующем устройстве (рис. 3.2.9) в камеру В второго элемента сравнения вводится постоянное давление P_0 ?
20. Как экспериментально определить постоянную времени интегрирующего звена?
21. Как экспериментально определить постоянную времени дифференцирующего звена?
22. Как экспериментально определить постоянную времени апериодического звена?
23. Чем определяется точность экспериментального определения постоянной времени интегрирующего, дифференцирующего и апериодического звеньев?
24. Как изменится структурная схема дифференцирующего устройства (рис. 3.2.9), если в камеру В второго элемента сравнения ввести постоянное давление P_0 ?
25. Как экспериментально определить статическую характеристику устройства?
26. Как по передаточной функции определяется значение выходного сигнала устройства в установившемся режиме?
27. Чем определяется точность экспериментального определения статической характеристики?
28. Как определить передаточную функцию повторителя расхода?
29. Как экспериментально определить статическую характеристику повторителя расхода газа?
30. Как определить эквивалентную проводимость последовательно соединенных дросселей 2 и 4, 3 и 5 в повторителе расхода (рис. 3.2.11)?
31. Чем определяется точность экспериментального определения статической характеристики повторителя расхода (рис. 3.2.13)?
32. Какие особенности синтеза пневматического устройства по заданным статическим характеристикам?
33. Какие особенности синтеза пневматического устройства по заданным передаточным функциям?

34. Какие особенности синтеза пневматического устройства по заданному качеству протекания технологического процесса?
35. В чем особенности работы АСР с объектом, обладающим большим транспортным запаздыванием?
36. По какому критерию ориентировочно выбирают тип регулятора?
37. Каково назначение блоков, входящих в состав АСР?
38. Какие блоки формируют входной сигнал пневматического регулятора, входящего в состав АСР?
39. Каковы особенности работы АСР, регулятор которой реализует непрерывный закон регулирования, с объектом, обладающим большим транспортным запаздыванием?
40. Как реализуется прерывистый закон регулирования?
41. Как реализуется переключающий блок в прерывистом регуляторе?
42. Как реализуется управляющий блок в прерывистом регуляторе?
43. Почему при написании уравнения равновесия мембранного блока элемента сравнения (рис. 3.1.1) не учитываются давления в камерах А и Е?
44. На чем основан эвристический синтез?
45. На основании каких законов механики выводится уравнение равновесия мембранного блока элемента сравнения (рис. 3.1.1)?
46. Почему камера Г элемента сравнения 5 (рис. 3.1.2) соединена с атмосферой?
47. Почему выходное давление P_3 элемента сравнения 1 (рис. 3.1.2) больше входного давления P_1 ?
48. Почему выходное давление P_4 элемента сравнения 3 (рис. 3.1.2) меньше входного давления P_2 ?
49. При каком условии равновесие мембранного блока элемента сравнения (рис. 3.1.1) описывается уравнением, содержащим равенство алгебраической суммы давлений нулю?
50. Почему выходной сигнал апериодического звена (рис. 3.2.1) возрастает медленнее, чем выходной сигнал интегрирующего звена (рис. 3.2.4)?
51. Согласно какому принципу осуществляется синтез повторителя расхода газа (рис. 3.2.10)?
52. Какие процессы в технике можно математически описать дифференцированием?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

-
1. Дмитриев В.Н., Граденкий В.Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1973. 360 с.
 2. Элементы и схемы пневмоавтоматики / Т.К. Берендс, Т.К. Ефремова, А.А. Тагаевская, С.А. Юдицкий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1976. 246 с.
 3. Балакирев В.С., Софиев А.Э. Применение средств пневмо-гидроавтоматики в химических производствах. М.: Химия, 1984. 192 с.
 4. Ибрагимов И.А., Фарзани Н.Г., Илясов Л.В. Элементы и системы пневмоавтоматики. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985. 544 с.
 5. Рого К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений: Справ. пособие. Киев: Техника, 1987. 128 с.
 6. Егоров К.В. Основы теории автоматического регулирования. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1967. 648 с.
 7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
 8. Дворецкий С.И., Лазарева Т.Я. Проектирование автоматизированных систем управления химико-технологическими процессами: Учеб. пособие. Тамбов: ТГТУ, 1993. 206 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

АНАЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1. Соотношение между электрическими и пневматическими величинами

Определение физической величины	Величины					
	электрические			пневматические		
	наименование величины	единица измерения	обозначение	наименование величины	единица измерения	обозначение
Упорядоченное движение носителей зарядов (электроны или частицы газа)	ток	А	I	расход	кг/с	G
Величина, равная работе электрических и сторонних сил по перемещению заряда	напряжение	В	U	давление	Н/м ²	ΔP
Коэффициент пропорциональности между силой тока и разностью потенциалов	проводимость	Ом ⁻¹	$1/R$	проводимость	м·с	α

Количество зарядов	заряд	Кл	Q	заряд камеры	кг	N
Сила, действующая на единицу заряда, или производная давления на расстояние	напряженность	$\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$	E	напряженность	$\text{Н} / \text{м}^{-3}$	$E = \frac{dP}{dx}$
Способность к накоплению заряда	емкость	Φ	C	емкость	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{Н}}$	$G = \frac{dN}{dP}$
Величина инертности, т.е. сопротивление к изменению скорости зарядов	индуктивность	$\Gamma \text{н}$	L	индуктивность	$\frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}^2}$	$L = \frac{\Delta P}{\frac{d^2 N}{dt^2}}$

2. Законы, описывающие электрические и пневматические цепи

Наименование закона	Формулировка законов для цепей	
	электрической	пневматической
Закон Ома для участка цепи	Сила тока в проводнике пропорционально разности потенциалов на его концах $I \approx (\varphi_1 - \varphi_2),$ $I = \frac{1}{R}(\varphi_1 - \varphi_2)$	Величина расхода газа через капилляр пропорциональна разности давлений на его концах $G \approx (P_1 - P_2),$ $G = \alpha(P_1 - P_2)$
Обобщенный закон Ома	Сила тока на участке цепи, где имеется источник ЭДС, пропорциональна сумме разности потенциалов на его концах и ЭДС $I \approx (U_1 - U_2 + E),$ $I = \frac{1}{R}(U_1 - U_2 + E)$	Величина расхода газа через капилляр пропорциональна сумме разности давлений на его концах и расходу источника газа $G \approx (P_1 - P_2) + G_{\text{и}},$ $G = \alpha(P_1 - P_2) + G_{\text{и}}$
Первое правило Кирхгофа	Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю $\sum_{i=1}^n I_i = 0$	Алгебраическая сумма расходов газа в узле равна нулю $\sum_{i=1}^n G_i = 0$

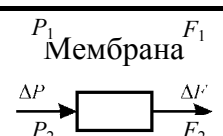
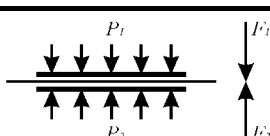
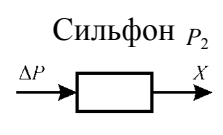
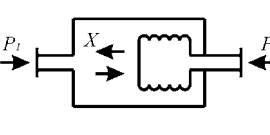
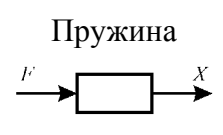
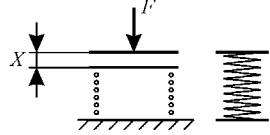
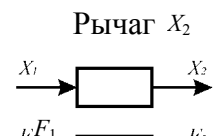
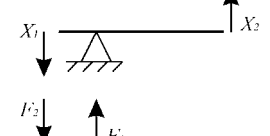

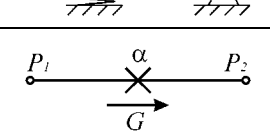
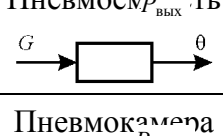
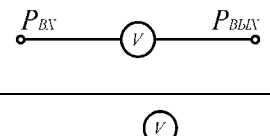

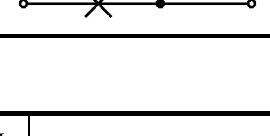
Основные физические свойства воздуха при нормальном давлении

Свойство	Обозначение	Множитель	Размерность	Величина	
				0 °С	25 °С
1. Молекулярная масса	m	–	–	29	
2. Плотность	ρ	–	кг/м ³	1,293	1,205 (20 °С)
3. Динамическая вязкость	η	10 ⁻⁷	Па·с	171	184
4. Кинематическая вязкость	ν	10 ⁻⁷	м ² /с	132	
5. Температурный коэффициент расширения		10 ⁻⁵	К ⁻¹	367	
6. Теплопроводность	λ	10 ⁻⁴	Вт/(м·К)	243	257
7. Удельные массовые теплоемкости:					
при постоянном давлении	C_p	–	Дж/(кг·К)	1004	
при постоянном объеме	C_v	–	Дж/(кг·К)	717	
8. Показатель адиабаты	γ	–	–	1,4	
9. Скорость звука	c	–	м/с	331,36	
10. Газовая постоянная	R	–	Дж/(кг·К)	287	
11. Показатель поглощения звука при 1 кГц, относительной влажности 10 %		10 ⁻⁴	м ⁻¹		13

12. Диэлектрическая проницаемость	ϵ	—	—	1,00005 9	
13. Растворимость в воде по массе		—	%	0,036	0,02 2

Приложение 3

Конструкции типовых звеньев и устройств пневмоавтоматики

Название элемента или устройства. Условное изображение	Конструкция элемента или устройства	Математическое описание элемента или устройства
P_1 Мембрана F_1 		$F = F_1 - F_2 = S_0(P_1 - P_2);$ $W(s) = S_0$
P_1 Сильфон P_2 		$W(s) = \frac{F_3/K_c}{\tau_2 s^2 + \tau_1 s + 1};$ $x = \frac{F_3}{K_c}(P_1 - P_2)$
		$x = \frac{F}{K_{\Pi}};$ $W(s) = \frac{1/K_{\Pi}}{\tau_2 s^2 + \tau_1 s + 1}$
X_1 Рычаг X_2 		$x_2 = Kx_1; F_2 = KF_1;$ $W(s) = K$
F_1 Дроссель P_2 		$G = \alpha(P_1 - P_2);$ $W(s) = \alpha$
$P_{ВХ}$ Пневмодатчик $P_{ВЫХ}$ 		$P_{ВЫХ} V = \theta RT$
$P_{ВХ}$ Пневмокамень $P_{ВЫХ}$ 		$W(s) = \frac{1}{s\tau + 1}$

Продолжение прил. 3

Название элемента или устройства. Условное изображение	Конструкция элемента или устройства	Математическое описание элемента или устройства

P_1	$P_{\text{ВЫХ}}$	<p>Дроссельный сумматор $P_{\text{ВЫХ}}$</p>		$P_{\text{ВЫХ}} = KP_1 + (1-K)P_2,$ $K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$
$P_{\text{ВХ}}$	$P_{\text{ВЫХ}}$	<p>Дроссельный сумматор в режиме делителя</p>		$P_{\text{ВЫХ}} = KP_{\text{ВХ}},$ $K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$
P_1	$P_{\text{ВЫХ}}$	<p>Трехмембранный элемент сравнения</p>		$P_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} 1, & P_1 > P_2; \\ 0, & P_1 < P_2. \end{cases}$
$P_{\text{ВХ}}$	$P_{\text{ВЫХ}}$	<p>Трехмембранный элемент сравнения с отрицательной обратной связью</p>		$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ}}$
P_1	$P_{\text{ВЫХ}}$	<p>Пятимембранный элемент сравнения</p>		$P_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} 1, & P_1 > P_2; \\ 0, & P_1 < P_2. \end{cases}$
P_1	$P_{\text{ВЫХ}}$	<p>Пятимембранный элемент сравнения с отрицательной обратной связью</p>		$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 - P_2$

Преобразование Лапласа для некоторых функций, встречающихся при анализе и синтезе

Оригинал $P(t)$	График функции $P(t)$	Изображение $P(s)$
$1(t)$		$\frac{1}{s}$
$1(t-a)$		$\frac{1}{s} e^{-as}$
t		$\frac{1}{s^2}$
t^2		$\frac{1}{s^3}$
$e^{+\tau t}$ $e^{\pm\tau t}$ $e^{-\tau t}$		$\frac{1}{s \mp \tau}$
$\frac{1}{\tau}(1 - e^{-\tau t})$		$\frac{1}{s(s + \tau)}$

Продолжение прил. 5

Оригинал $P(t)$	График функции $P(t)$	Изображение $P(s)$
$\sin \omega t$		$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\cos \omega t$		$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$

$P(t)$

$e^{-\tau t}$

$e^{-\tau t} \sin \omega t$		$\frac{\tau}{(s + \tau)^2 + \omega^2}$
$e^{-\tau t} \cos \omega t$		$\frac{s + \tau}{(s + \tau)^2 + \omega^2}$

Приложение 6

Преобразование Лапласа для типовых математических операций

$P(t)$ – оригинал	$P(s)$ – изображение
$aP(t)$	$aP(s)$
$P_1(t) \pm P_2(t)$	$P_1(s) \pm P_2(s)$
$\frac{dP(t)}{dt}$	$sP(s) - P(0)$
$\frac{d^2P(t)}{dt^2}$	$s^2P(s) - sP(0) - P'(0)$
$\int P(t)dt$	$\frac{P(s)}{s}$
$P(t - \tau)$	$e^{-\tau s} P(s)$
$P(at), a > 0$	$\frac{1}{a} P\left(\frac{s}{a}\right)$
$e^{at} P(t)$	$P(s - a)$

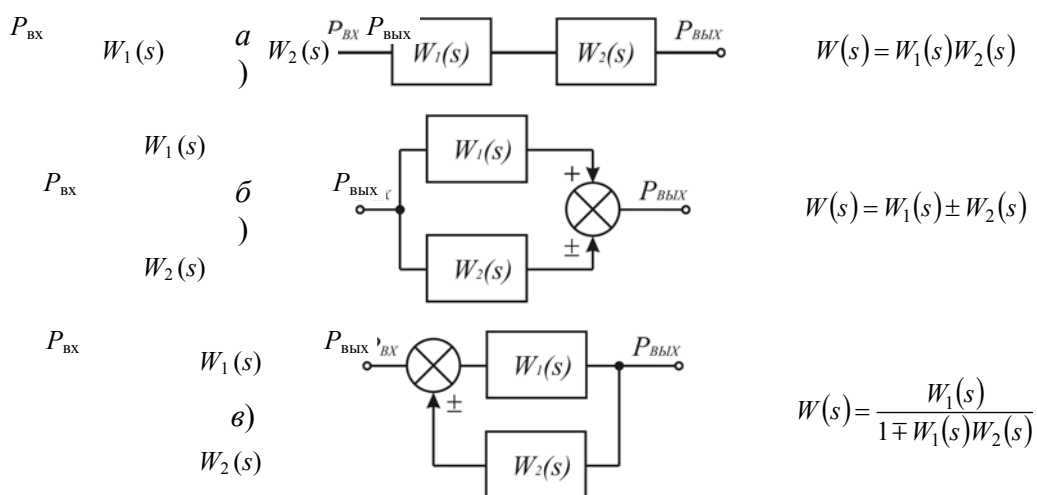
Виды соединения звеньев

Динамической структурной схемой или просто структурной схемой системы автоматического регулирования называют схему, составленную из типовых динамических звеньев.

Динамическим звеном называют часть системы, описываемую некоторым уравнением. Сложное звено можно представить как несколько элементарных типовых звеньев, соединенных определенным образом.

Обычно различают следующие типовые звенья: усилительное, инерционное, колебательное, интегрирующее, дифференцирующее, интегро-дифференцирующее, запаздывающее. Любое сложное звено можно представить как соединение указанных выше типовых звеньев.

Включение звеньев системы может быть выполнено в виде трех основных форм: последовательное (а), параллельное (б) или с обратной связью (в).



Если в прямой цепи системы, имеющей отрицательную обратную связь, располагается усилительное звено с большим коэффициентом усиления ($K \gg 1$), то передаточная функция $W(s)$ системы определяется передаточной функцией $W_{oc}(s)$ обратной связи:

$$W(s) = \frac{K}{1 + KW_{oc}(s)} = \frac{1}{\frac{1}{K} + W_{oc}(s)} = \frac{1}{W_{oc}(s)}$$

1.5.1. Решение линейного дифференциального уравнения второго порядка

Значение дискриминанта характеристического уравнения	Значение корней характеристического уравнения	Общее решение дифференциального уравнения	Значение коэффициентов
$a_1^2 - 4a_2a_0 > 0$	$\lambda_1 = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2a_0}}{2a_2};$ $\lambda_2 = \frac{-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_2a_0}}{2a_2}$	$P_{вых}(t) = C_0 + C_1e^{\lambda_1 t} + C_2e^{\lambda_2 t}$	$C_0 = \frac{b}{a_0};$ $C_1 = \frac{-b - \lambda_2}{a_0 \lambda_2 - \lambda_1};$ $C_2 = \frac{b - \lambda_1}{a_0 \lambda_2 - \lambda_1}$

$a_1^2 - 4a_2a_0 = 0$	$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = \frac{-a_1}{2a_2}$	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = C_0 + (C_1 + C_2t)e^{\lambda t}$	$C_0 = \frac{b}{a_0};$ $C_1 = \frac{-b}{a_0}; \quad C_2 = \frac{b\lambda}{a_0}$
$a_1^2 - 4a_2a_0 < 0$	$\lambda_1 = r - \mu i; \quad \lambda_2 = r + \mu i,$ $r = \frac{-a_1}{2a_2},$ $\mu = \sqrt{4a_2a_0 - a_1^2}$	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = e^{rt} (C_1 \cos \mu t + C_2 \sin \mu t) + C_0$	$C_0 = \frac{b}{a_0};$ $C_1 = \frac{-b}{a_0}; \quad C_2 = \frac{rb}{\mu a_0}$

1.6.1. Результаты анализа математической модели процесса измерения

Исходные условия $\alpha = \text{const}, T = \text{const}$	Математическая модель	Начальные условия	Решение
$G_n \mid V_1 \mid V_2$			

Var	Var	Var	$\begin{cases} V_1 \frac{dP_1(t)}{dt} + P_1(t) \left(\frac{dV_1(t)}{dt} + \alpha RT \right) = \alpha RTP_2(t) + RTG_n(t); \\ V_2 \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) \left(\frac{dV_2(t)}{dt} + \alpha RT \right) = \alpha RTP_1(t) \end{cases}$	$\begin{aligned} P_1(0) &= P_{10}, \\ P_2(0) &= P_{20}, \\ V_1(0) &= V_{10}, \\ V_2(0) &= V_{20}, \\ G_n(0) &= G_0. \end{aligned}$	В общем виде в квадратурах неразрешимо
Var	Const	Var	$\begin{cases} \tau_1 \frac{dP_1(t)}{dt} + P_1(t) = P_2(t) + \frac{G_n(t)}{\alpha}; \\ \tau_2 \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) \left(\frac{1}{\alpha RT} \frac{dV_2(t)}{dt} + 1 \right) = P_1(t) \end{cases}$	$\begin{aligned} P_1(0) &= P_{10}, \\ P_2(0) &= P_{20}, \\ V_2(0) &= V_{20}, \\ G_n(0) &= G_0. \end{aligned}$	В общем виде в квадратурах неразрешимо
Var	Const	Const	$\begin{cases} \tau_1 \frac{dP_1(t)}{dt} + P_1(t) = P_2(t) + \frac{G_n(t)}{\alpha}; \\ \tau_2 \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) = P_1(t) \end{cases}$	$\begin{aligned} P_1(0) &= P_{10}, \\ P_2(0) &= P_{20}, \\ G_n(0) &= G_0. \end{aligned}$	$\begin{aligned} P_1(t) &= P_{cp} + \frac{G_n(t)\tau_2^2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} + \\ &+ \left(P_{10} - \frac{G_n(t)\tau_2^2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} - P_{cp} \right) \exp\left[-\frac{t}{\tau_3}\right] + \\ &+ \frac{1}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)} \int_0^t G_n(\tau) d\tau; \\ P_2(t) &= P_{cp} + \frac{G_n(t)\tau_1\tau_2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} + \\ &+ \left(P_{cp} - \frac{G_n(t)\tau_1\tau_2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} - P_{10} \right) \exp\left[-\frac{t}{\tau_3}\right] + \\ &+ \frac{1}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)} \int_0^t G_n(\tau) d\tau \end{aligned}$

Продолжение табл. 1.6.1

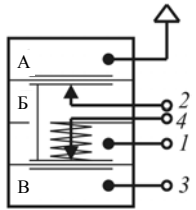
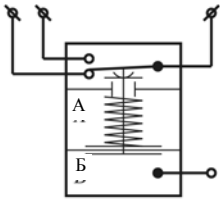
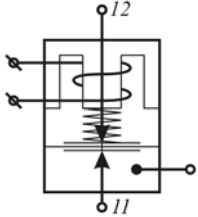
Исходные условия $\alpha = \text{const}, T = \text{const}$			Математическая модель	Начальные условия	Решение
G_n	V_1	V_2			
Const	Const	Const	$\begin{cases} \tau_1 \frac{dP_1(t)}{dt} + P_1(t) = P_2(t) + \frac{G_n(t)}{\alpha}; \\ \tau_2 \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) = P_1(t) \end{cases}$	$\begin{aligned} P_1(0) &= P_{10}, \\ P_2(0) &= P_{20}. \end{aligned}$	$\begin{aligned} P_1(t) &= P_{cp} + \frac{G_n(t)\tau_2^2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} + \\ &+ \left(P_{10} - \frac{G_n(t)\tau_2^2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} - P_{cp} \right) \exp\left[-\frac{t}{\tau_3}\right] + \\ &+ \frac{G_0 t}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)}; \\ P_2(t) &= P_{cp} + \frac{G_n(t)\tau_1\tau_2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} + \\ &+ \left(P_{cp} - \frac{G_n(t)\tau_1\tau_2}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)^2} - P_{20} \right) \exp\left[-\frac{t}{\tau_3}\right] + \\ &+ \frac{G_0 t}{\alpha(\tau_1 + \tau_2)} \end{aligned}$
0	Const	Const	$\begin{cases} \tau_1 \frac{dP_1(t)}{dt} + P_1(t) = P_2(t); \\ \tau_2 \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) = P_1(t) \end{cases}$	$\begin{aligned} P_1(0) &= P_{10}, \\ P_2(0) &= P_{20}, \\ P_{10} &> P_{20}. \end{aligned}$	$\begin{aligned} P_1(t) &= P_{cp} + (P_{10} - P_{cp}) \exp\left[-\frac{t}{\tau_3}\right], \\ \tau_3 &= \frac{\tau_1\tau_2}{\tau_1 + \tau_2}; \\ P_2(t) &= P_{cp} - (P_{cp} - P_{20}) \exp\left[-\frac{t}{\tau_3}\right], \\ P_{cp} &= \frac{\tau_1 P_{10} + \tau_2 P_{20}}{\tau_1 + \tau_2} \end{aligned}$

Технические характеристики комплекса элементов УСЭША

Название и тип элемента	Конструкция элемента	Назначение элемента	Характеристики элемента
1	2	3	4
Индикатор пневматический типа ИП-1		Для визуального представления дискретной информации посредством изменения цвета показывающего органа	Выходные пневматические сигналы – дискретные "0" или "1"
Реле трехмембранное пневматическое типа П1Р.1		Для реализации логических функций и коммутации непрерывных сигналов	Выходные пневматические сигналы – дискретные "0" или "1" по ГОСТ 13053–67. Расход воздуха на выходе не менее 1,2 м ³ /ч
Реле трехмембранное пневматическое типа П1Р.3	 <p>А Б В Г</p>	Для реализации логических функций и коммутации непрерывных сигналов. В начальный момент мембран блок находится в определенном положении под действием пружины	Выходные пневматические сигналы – дискретные "0" или "1" по ГОСТ 13053–67. Расход воздуха на выходе не менее 1,2 м ³ /ч
Реле универсальное пневматическое типа РУП-1М		Для реализации логических функций и коммутации непрерывных сигналов. Мощный выходной сигнал	Выходные пневматические сигналы – дискретные "0" или "1" по ГОСТ 13053–67. Расход воздуха на выходе не менее 5 м ³ /ч

Продолжение прил. 4

1	2	3	4
---	---	---	---

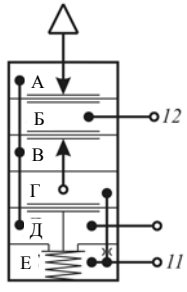
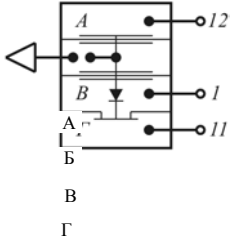
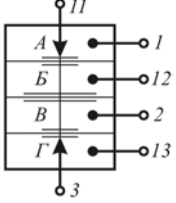
Реле выключающее типа П-1108		Для коммутации аналоговых и дискретных пневматических сигналов	Давление коммутируемого сигнала 0...0,154 МПа. Командные сигналы – дискретные "0" или "1". Расход воздуха на выходе не менее 1,2 м ³ /ч при перепаде давления 0,14 МПа
Пневмопреобразователь типа П1ПР.4		Для преобразования пневматического дискретного сигнала в электрический дискретный сигнал	Входной пневматический сигнал "0" или "1". Выходной сигнал – постоянный ток напряжения 24 В сила тока не более 4 А
Преобразователь электропневматический типа П1ПР.5		Для преобразования дискретного электрического сигнала в дискретный пневматический сигнал и коммутирования пневматических сигналов	Входной сигнал дискретный электрический "0" или "1" (24 В). Коммутируемые сигналы дискретные и аналоговые

Продолжение прил. 4

1	2	3	4																				
Дроссель регулируемый типа П2Д.2М		Для создания настраиваемого перепада давлений	<p>Рабочий диапазон изменения входных сигналов 0...0,14 МПа. Диапазон настройки расхода воздуха 0,04...250 л/ч</p> <table border="1" data-bbox="948 1167 1402 1442"> <thead> <tr> <th>Модификация дросселя</th> <th colspan="2">Размер капилляра, мм</th> <th>Расход, 10⁻⁶ м³/с±10 %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>П2Д.4-1</td> <td>0,18</td> <td>20</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>П2Д.4-2</td> <td>0,30</td> <td>20</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>П2Д.4-3</td> <td>0,18</td> <td>7</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>П2Д.4-4</td> <td>0,50</td> <td>20</td> <td>62</td> </tr> </tbody> </table>	Модификация дросселя	Размер капилляра, мм		Расход, 10 ⁻⁶ м ³ /с±10 %	П2Д.4-1	0,18	20	6	П2Д.4-2	0,30	20	18	П2Д.4-3	0,18	7	7	П2Д.4-4	0,50	20	62
Модификация дросселя	Размер капилляра, мм		Расход, 10 ⁻⁶ м ³ /с±10 %																				
П2Д.4-1	0,18	20	6																				
П2Д.4-2	0,30	20	18																				
П2Д.4-3	0,18	7	7																				
П2Д.4-4	0,50	20	62																				
Сопротивление регулируемое типа П2Д.1М		Для создания настраиваемого перепада давлений	Рабочий диапазон изменения входных сигналов 0...0,14 МПа. Диапазон настройки расхода воздуха 0,04...250 л/ч. Невоспроизводимость установки расхода воздуха по шкале не более 10 % от номинального значения установленного расхода																				
Задатчики типов П23Д.3 и П23Д.3П		Для установки местного задания в узлах и блоках средств пневмоавтоматики	Выходной сигнал имеет малую мощность и подается в непроточные камеры элементов в пределах одной платы или одного прибора. Расход в выходной линии не допускается. Питание подается через сопротивление П2Д.4-2																				

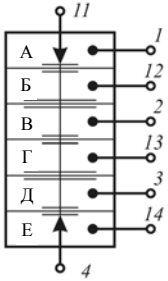
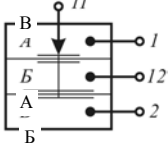
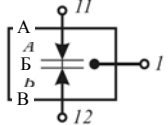
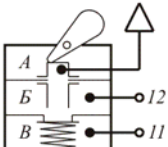
1	2	3	4
Задатчик управления типа П23Д4		Для установки и стабильного поддержания сигнала в устройствах и системах пневмоавтоматики	Рабочий диапазон настройки задания 0,02...0,1 МПа. Расход воздуха на выходе не менее 1,5 м ³ /ч. Непостоянство задания в течение 48 ч не более ± 0,0005 МПа
Пневмоповторитель типа П2П.1	 <p data-bbox="403 1283 419 1339">А Б</p>	Для создания выходного сигнала, равного по давлению входному сигналу	Класс точности 0,25. Рабочий диапазон изменения входных и выходных сигналов 0,02...0,1 МПа. Метрологические характеристики элемента гарантируются только при отсутствии расхода на его выходе. Дополнительная погрешность, вызванная отклонением температуры окружающего воздуха от 20 ± 2 °С на каждые 10 °С не более 0,15 %
Пневмоповторитель со сдвигом типа П2П.2		Для создания выходного сигнала, отличающегося по давлению от входного сигнала на постоянную величину	Пневмоповторитель имеет возвратную и установочную пружины. Класс точности 0,4. Диапазон сдвига не менее 15 кПа. Изменение сдвига ±1 %

1	2	3	4
---	---	---	---

<p>Пневмоповторитель с мощным выходом типа П2П.7</p>	 <p>А В Г</p>	<p>Для точного повторения пневматического аналогового сигнала с одновременным усилением по мощности</p>	<p>Класс точности 0,5. Порог чувствительности не более 0,1 % от рабочего диапазона изменения выходного сигнала. Расход воздуха питания более 0,08 м³/ч. Расход воздуха на выходе не менее 1,5 м³/ч. Дополнительная погрешность, вызванная отклонением температуры окружающего воздуха от 20 + 2 °С на каждые 10 °С, не более 0,3 %</p>
<p>Пневмоповторитель – усилитель мощности типа П2П.3</p>	 <p>А В Г</p>	<p>Для выдачи усиленного по мощности пневматического сигнала, равного по давлению входному сигналу</p>	<p>Порог чувствительности не более 0,3 % от рабочего диапазона изменения выходного сигнала. Расход воздуха питания не более 0,04 м³/ч. Расход воздуха на выходе не менее 1,5 м³/ч. Дополнительная погрешность, вызванная отклонением температуры окружающего воздуха от 20 + 2 °С на каждые 10 °С, не более 0,6 %</p>
<p>Элемент сравнения трехмембранный типа П2ЭС.1</p>		<p>Для сравнения двух изменяющихся по величине пневматических сигналов и формирования на выходе дискретных пневматических сигналов "0" и "1"</p>	<p>Класс точности 0,4. Рассогласование не более ±0,00032 МПа. Дифференциал не более 0,00064 МПа</p>

Продолжение прил. 4

1	2	3	4
---	---	---	---

Элемент сравнения пятиимпульсный типа П2ЭС.3		Для сравнения четырех непрерывных пневматических сигналов и формирования на выходе дискретных пневматических сигналов "0" или "1" либо алгебраического суммирования трех сигналов	Класс точности 0,4. Рассогласование не более $\pm 0,00032$ МПа. Дифференциал не более $0,00064$ МПа
Клапан одноконтактный типа ПЗК.1		Для коммутации непрерывных сигналов или для использования в качестве вентиля в дискретных устройствах	Рабочий диапазон изменения коммутируемых сигналов $0 \dots 0,154$ МПа. Входные командные сигналы "0" и "1". Расход воздуха на выходе не менее $1,2 \text{ м}^3/\text{ч}$
Клапан ИЛИ типа ПЗК.5		Для реализации логической функции ИЛИ двух переменных	Входные и выходные сигналы "0" или "1". Расход воздуха на выходе не менее $1 \text{ м}^3/\text{ч}$
Пневмотумблер типа П1Г.2		Для ручной подачи командных сигналов в схемах пневмоавтоматики	Выходной пневматический сигнал дискретный "0" или "1". Расход воздуха на выходе не менее $5 \text{ м}^3/\text{ч}$

Продолжение прил. 4

1	2	3	4
Пневмокнопка типа П1КН.3		Для кратковременного ручного коммутирования схем пневмоавтоматики	Выходной пневматический сигнал дискретный "0" или "1". Расход воздуха на выходе не менее $5 \text{ м}^3/\text{ч}$
Пневматическая емкость типа ПОЕ.50		Для построения инерционных звеньев в системах контроля и управления	Рабочий объем пневмоемкости $50 \pm 8 \text{ см}^3$
Фильтр типа ПОФ.2		Для местной очистки воздуха питания	Расход воздуха на выходе не менее $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$
Вентиль типа ПОВ.1		Для коммутации вручную мощной пневматической линии связи	Расход воздуха на выходе не менее $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$
Клапан обратный типа ПЗОК.1		Пропускает сигнал в одном направлении (пневматический диод)	Диапазон входных и выходных сигналов $0 \dots 0,154$ МПа. Пропускная способность $5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Падение давления входного сигнала на клапане $0,007$ МПа
Выключатель конечный типа П1ВК.1		Для формирования на выходе пневматического дискретного сигнала	Выходной пневматический сигнал дискретный "0" или "1". Расход воздуха на выходе не менее $5 \text{ м}^3/\text{ч}$

Характеристики типовых звеньев систем автоматического регулирования

Название звена	Уравнение звена	Передаточная функция	Переходная функция	
			уравнение	график
Усилительное	$P_{\text{ВЫХ}} = KP_{\text{ВХ}}$	$W(s) = K$	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = K \cdot 1(t)$	
Инерционное	$\tau \frac{dP_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + P_{\text{ВЫХ}}(t) = KP_{\text{ВХ}}(t)$	$W(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = K \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$	

$P_{\text{ВЫХ}}(t)$

K

t

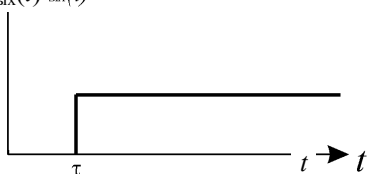
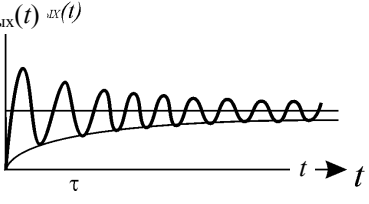
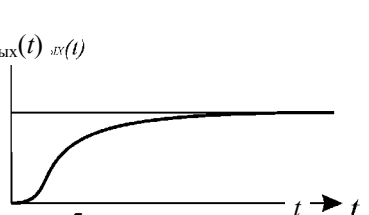
Интегрирующее	$\tau \frac{dP_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} = KP_{\text{ВХ}}(t)$	$W(s) = \frac{K}{\tau s}$	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{K}{\tau} t$	
---------------	--	---------------------------	--	--

Продолжение прил. 8

Название звена	Уравнение звена	Передаточная функция	Переходная функция	
			уравнение	график
Дифференцирующее	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = \tau \frac{dP_{\text{ВХ}}(t)}{dt}$	$W(s) = \tau s$	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = \delta(t)$	
Интегро-дифференцирующее	$\tau_2 \frac{dP_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + P_{\text{ВЫХ}}(t) = K \left(\tau_1 \frac{dP_{\text{ВХ}}(t)}{dt} + P_{\text{ВХ}}(t) \right)$	$W(s) = \frac{K(\tau_1 s + 1)}{\tau_2 s + 1}$	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{P_{\text{ВЫХ}}(t) P_{\text{ВЫХ}}(t)}{K \left[1 + \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right]}$	

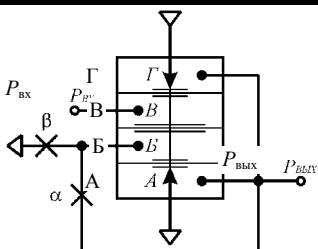
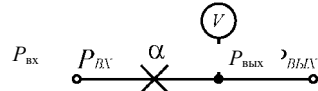
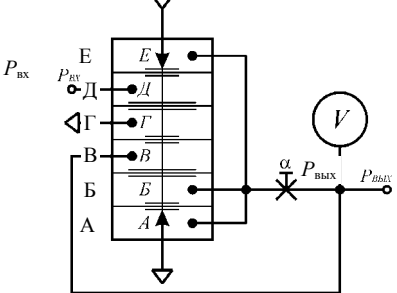
Продолжение прил. 8

Название звена	Уравнение звена	Передаточная функция	Переходная функция	
			уравнение	график

Запаздывающее	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = P_{\text{ВХ}}(t - \tau)$	$W(s) = e^{-s\tau}$	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = 1(t - \tau)$	$P_{\text{ВЫХ}}(t)_{\text{ВЫХ}}(t)$ 
Колебательное	$\tau_1^2 \frac{d^2 P_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^2} + \tau_2 \frac{dP_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + P_{\text{ВЫХ}}(t) = KP_{\text{ВХ}}(t)$	$W(s) = \frac{K}{\tau_1^2 s^2 + \tau_2 s + 1}$	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = K [1 - K_1 e^{-at} \times \sin(\omega t + \phi)]$ при $\tau_2^2 - 4\tau_1^2 < 0$	$P_{\text{ВЫХ}}(t)_{\text{ВЫХ}}(t)$ 
			$P_{\text{ВЫХ}}(t) = C_1 e^{-at} - C_2 e^{-bt} + K$ при $\tau_2^2 - 4\tau_1^2 > 0$	$P_{\text{ВЫХ}}(t)_{\text{ВЫХ}}(t)$ 

Приложение 9

Построение типовых звеньев систем автоматического регулирования на элементах пневмоавтоматики

Название звена	Принципиальная схема	Уравнение звена
Усилительное		$P_{\text{ВЫХ}} = KP_{\text{ВХ}}, K = \frac{\alpha + \beta}{\alpha} > 1$
Инерционное		$\tau \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} + P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ}}, \tau = \frac{V}{\alpha RT}$
Интегрирующее		$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{\tau} \int_0^t P_{\text{ВХ}}(t) dt, \tau = \frac{V}{\alpha RT}$

Название звена	Принципиальная схема	Уравнение звена
Дифференцирующее		$P_{\text{ВЫХ}} = \tau \frac{dP_{\text{ВХ}}}{dt},$ $\tau = \frac{V}{\alpha RT}$
Интегро-дифференцирующее		$\tau \frac{dP_{\text{ВЫХ}} + P_{\text{ВЫХ}}}{dt} =$ $= 2\tau \frac{dP_{\text{ВХ}}}{dt} + P_{\text{ВХ}}$
Запаздывающее		$P_{\text{ВЫХ}}(t) = P_{\text{ВХ}}(t - \tau)$

**Синтезированные пневматические устройства,
построенные на дросселирующих и накопительных элементах**

Принципиальная схема устройства	Структурная схема устройства	Математическое описание процессов, протекающих в устройстве	Выходной сигнал
		$G_1 = \alpha(P_1 - P_{\text{ВЫХ}}),$ $G_2 = \beta P_{\text{ВЫХ}},$ $G_{\text{ВЫХ}} = 0,$ $G_1 = G_2$	$P_{\text{ВЫХ}} = KP_1,$ $K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$
		$G_1 = \alpha(P_1 - P_{\text{ВЫХ}}),$ $G_2 = \beta(P_2 - P_{\text{ВЫХ}}),$ $G_{\text{ВЫХ}} = 0,$ $G_1 + G_2 = 0$	$P_{\text{ВЫХ}} = KP_1 + (1 - K)P_2,$ $K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$

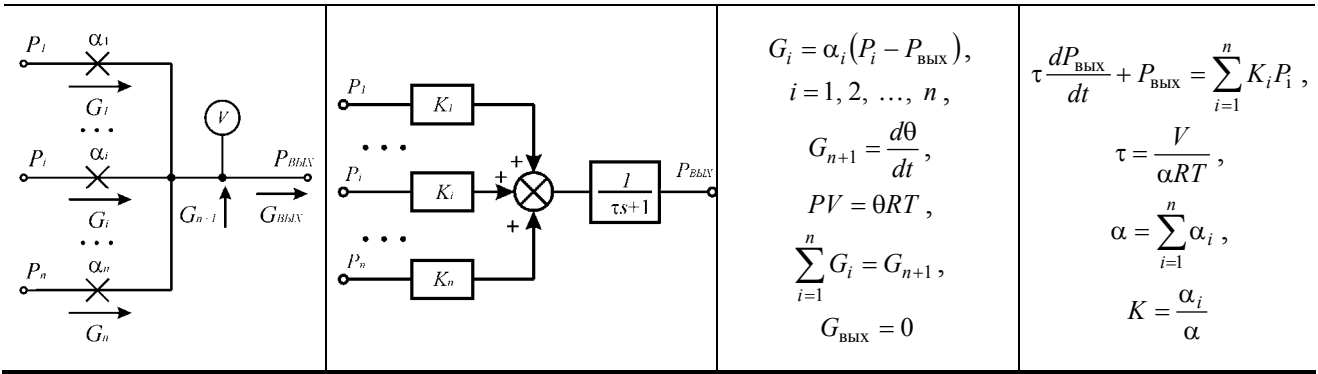
Принципиальная схема устройства	Структурная схема устройства	Математическое описание процессов, протекающих в устройстве	Выходной сигнал
		$G_i = \alpha_i (P_i - P_{\text{ВЫХ}}),$ $i = 1, 2, \dots, n,$ $\sum_{i=1}^n G_i = 0,$ $G_{\text{ВЫХ}} = 0$	$P_{\text{ВЫХ}} = \sum_{i=1}^n K_i P_i,$ $K = \frac{\alpha_i}{\alpha},$ $\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i,$ $\sum_{i=1}^n K_i = 1$
		$G_1 = \alpha (P_1 - P_{\text{ВЫХ}}),$ $PV = \theta RT,$ $G_2 = \frac{d\theta}{dt}, G_{\text{ВЫХ}} = 0$	$\tau \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} + P_{\text{ВЫХ}} = P_1,$ $\tau = \frac{V}{\alpha RT}$

Принципиальная схема устройства	Структурная схема устройства	Математическое описание процессов, протекающих в устройстве	Выходной сигнал
		$G_1 = \alpha (P_1 - P_{\text{ВЫХ}}),$ $G_2 = \beta (P_2 - P_{\text{ВЫХ}}),$ $G_1 + G_2 = G_3,$ $G_{\text{ВЫХ}} = 0,$ $PV = \theta RT,$ $G_3 = \frac{d\theta}{dt}$	$\tau \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} + P_{\text{ВЫХ}} =$ $= KP_1 + (1 - K)P_2,$ $\tau = \frac{V}{(\alpha + \beta)RT}$

P_1
 G_1
 P_i
 G_i
 G_{n+1}
 $G_{\text{ВЫХ}}$

P_1
 $P_{\text{ВЫХ}}$
 P_i
 K_1
 K_i

P_1
 K_1
 $1 - K$
 1
 $P_{\text{ВЫХ}}$



Принципиальная схема устройства	Структурная схема устройства	Математическое описание процессов, протекающих в устройстве	Выходной сигнал
		$G_1 = \alpha_1(P_1 - P_2),$ $G_2 = \alpha_2(P_2 - P_{\text{ВЫХ}}),$ $G_1 = G_2 + G_3,$ $G_3 = \frac{d\theta_1}{dt}, \quad P_2V = \theta_1RT,$ $P_{\text{ВЫХ}}V = \theta_2RT, \quad G_2 = G_4,$ $G_{\text{ВЫХ}} = 0, \quad G_4 = \frac{d\theta_2}{dt}$	$\tau_1\tau_2 \frac{d^2P_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} +$ $+ (2\tau_1 + \tau_2) \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} +$ $+ P_{\text{ВЫХ}} = P_1,$ $\tau_1 = \frac{V}{\alpha_1RT}, \quad \tau_2 = \frac{V}{\alpha_2RT}$
		$G_1 = \alpha(P_1 - P_{\text{ВЫХ}}),$ $G_1 = G_2 + G_4,$ $G_3 + G_2 = G_5 + G_{\text{ВЫХ}},$ $G_{\text{ВЫХ}} = 0,$ $G_2 = \beta(P_3 - P_{\text{ВЫХ}}),$ $G_4 = \frac{d\theta_1}{dt}, \quad G_5 = \frac{d\theta_2}{dt},$ $P_3V = \theta_1RT, \quad P_{\text{ВЫХ}}V = \theta_2RT,$ $G_3 = \gamma(P_2 - P_{\text{ВЫХ}})$	$\tau_1\tau_2 \frac{d^2P_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} +$ $+ \left(\left(2 + \frac{\gamma}{\beta} \right) \tau_1 + \tau_2 \right) \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} +$ $+ \frac{\gamma + \beta}{\beta} P_{\text{ВЫХ}} = P_1 +$ $+ \left(\frac{\gamma}{\beta} + \frac{\gamma}{\alpha} \right) P_2 + \frac{\gamma}{\beta} \tau_1 \frac{dP_2}{dt},$ $\tau_1 = \frac{V}{\alpha RT}, \quad \tau_2 = \frac{V}{\beta RT}$

Принципиальная схема	Передаточная	Переходная функция
----------------------	--------------	--------------------

	функция	Аналитическое выражение	График
<p> P_1 P_1 α $G_{\text{ВЫХ}}$ $G_{\text{ВЫХ}}$ G_1 G_1 β G_2 G_2 $P_{\text{ВЫХ}}$ </p>	$W(s) = K$	$P_{\text{ВЫХ}} = K$	<p> $P_{\text{ВЫХ}}(t)$ $P_{\text{ВЫХ}}(t)$ K K $t \rightarrow t$ </p>
<p> P_1 P_1 α $P_{\text{ВЫХ}}$ $P_{\text{ВЫХ}}$ G_1 G_1 $G_{\text{ВЫХ}}$ $G_{\text{ВЫХ}}$ P_2 P_2 β G_2 G_2 </p>	$W_1(s) = K$, $W_2(s) = 1 - K$	$P_{\text{ВЫХ}} = KP_1 + (1 - K)P_2$	<p> $P_{\text{ВЫХ}}(t)$ $P_{\text{ВЫХ}}(t)$ $t \rightarrow t$ </p>

Принципиальная схема	Передаточная функция	Переходная функция	
		Аналитическое выражение	График
<p>Diagram showing a parallel system with \$n\$ inputs \$P_1, P_i, P_n\$ and gains \$G_1, G_i, G_n\$. Each input path has a gain block \$G_i\$ and a summing junction with gain \$\alpha_i\$. The outputs are summed to produce \$P_{\text{вых}}\$.</p>	$W_i(s) = K_i, \\ i = 1, 2, \dots, n$	$P_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^n K_i P_i$	<p>Graph showing the step response \$P_{\text{вых}}(t)\$ versus time \$t\$. The signal is zero until \$t=0\$, then jumps to a constant value.</p>

$P_{\text{вых}}(t)$

P_1 $P_{\text{вых}}$

P_0

G_1 G_2 $G_{\text{вых}}$

t

	$W(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$	$P_{\text{ВЫХ}} = P_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$	
--	-------------------------------	--	--

Продолжение прил. 10

Принципиальная схема	Передаточная функция	Переходная функция	
		Аналитическое выражение	График
	$W_1(s) = \frac{K}{\tau s + 1},$ $W_2(s) = \frac{1-K}{\tau s + 1}$	$P_{\text{ВЫХ}} = KP_{10} + (1-K)P_{20} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$	
	$W_i(s) = \frac{K_i}{\tau s + 1},$ $i = 1, 2, \dots, n$	$P_{\text{ВЫХ}} = \sum_{i=1}^n K_i P_{i0} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$	
	$W(s) = \frac{1}{\tau_1 \tau_2 s^2 + (2\tau_1 + \tau_2)s + 1}$	$P_{\text{ВЫХ}} = C_0 + C_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + C_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}$	