

**М.М. Мордасов, Д.М. Мордасов  
А.В. Трофимов, А.А. Чуриков**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ  
СРЕДСТВА  
АВТОМАТИЗАЦИИ**

**Часть 1**

**ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ ВЕТВЬ**

**◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**"Тамбовский государственный технический университет"**

**М.М. Мордасов, Д.М. Мордасов,  
А.В. Трофимов, А.А. Чуриков**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА  
АВТОМАТИЗАЦИИ**

**Часть 1**

**ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ ВЕТВЬ**

*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))"*



---

Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2005

УДК 681.5(07)  
ББК ←965я73  
Т38

**Рецензенты:**

Доктор технических наук, профессор  
*А.И. Фесенко*

Доктор технических наук, профессор  
*В.А. Ванин*

Т38 Технические средства автоматизации. Ч. 1. Пневматическая ветвь: Учеб. пособие / М.М. Мордасов, Д.М. Мордасов, А.В. Трофимов, А.А. Чуриков. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 168 с.

Приведены общие сведения о технических средствах автоматизации, о государственной системе промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП). Рассмотрены конструкции и принцип действия основных мембранных и струйных пневматических элементов. Приводится описание схем пневматических усилителей, преобразователей, генераторов, триггеров, вычислительных устройств, контрольно-измерительных приборов, регуляторов и исполнительных устройств. Показаны области применения и условия выбора пневматических средств автоматизации в зависимости от промышленных условий и сложности систем автоматического управления.

Пособие предназначено для студентов технических вузов и может быть полезно для самостоятельной работы, а также при выполнении курсовых и дипломных проектов.

УДК 681.5(07)  
ББК ←965я73

**ISBN 5-8265-0406-4** Мордасов М.М., Мордасов

© Д.М.,  
Трофимов А.В., Чуриков  
А.А., 2005  
Тамбовский государствен-  
ный  
технический университет  
(ТГТУ), 2005

©

Учебное издание

МОРДАСОВ Михаил Михайлович,  
МОРДАСОВ Денис Михайлович,  
ТРОФИМОВ Алексей Владимирович,  
ЧУРИКОВ Александр Алексеевич

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА  
АВТОМАТИЗАЦИИ**

Часть 1

ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ ВЕТВЬ

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано к печати 20.10.2005.

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

Гарнитура Times New Roman. Объем: 9,76 усл. печ. л.; 10,0 уч.-изд. л.

Тираж 150 экз. С. 496

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

---

Автоматизация является важнейшим фактором роста производительности труда в промышленном производстве.

К техническим средствам автоматизации относятся все устройства, входящие в систему контроля и управления, предназначенные для получения информации, ее передачи, хранения и преобразования, а также для осуществления управляющих и регулирующих воздействий на технологический объект управления.

Основное внимание в настоящем пособии уделяется техническим средствам, использующим энергию сжатого воздуха. При разработке и внедрении систем автоматического контроля и управления технологическими процессами в химической, нефтяной, нефтехимической, лакокрасочной и ряде других отраслей промышленности целесообразно использование пневматических средств автоматизации.

*Пневмоавтоматика* – область технической кибернетики, охватывающая принципы и средства построения элементов, приборов и систем автоматического контроля и управления, использующих в работе различные эффекты газовой динамики. Пневмоавтоматика является одним из основных средств автоматизации производственных процессов.

Выбор электрической или пневматической системы контроля или управления зависит от местных условий эксплуатации и предъявляемых к этой системе требований. В настоящее время разрабатываются оба вида технических средств, так как общий спрос на них примерно одинаков.

Разработка технических средств пневмоавтоматики значительно ускорилась после того, как в нашей стране был предложен элементный принцип конструирования пневматических приборов. Согласно этому принципу пневматический прибор собирается из пневматических элементов универсального назначения. Отечественные пневматические средства автоматизации базируются преимущественно на универсальной системе элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА), комплексе миниатюрных элементов и модулей пневмоавтоматики (КЭМП) и, частично, системе элементов струйной техники. Все элементы выполняют лишь элементарные функции, имеют свой аналог в электрической и электронной аппаратуре и позволяют реализовать измерительные устройства непрерывного, а часто дискретного и непрерывно-дискретного действия, когда, например, управляющая логическая часть задает режимы работы отдельным измерительным элементам либо включает их в определенной последовательности. Элементы УСЭППА и устройства на их основе делят на две группы: аналоговую и дискретную. Возможна комбинация элементов обеих групп с целью создания дискретно-аналоговых измерительных устройств. Пневматические элементы просты по конструкции и по технологии изготовления, относительно компактны, кроме того, они достаточно дешевы и легко отлаживаются. В случае применения элементного принципа, становится возможным использование регулярных методов построения измерительных схем.

Знания конструктивного выполнения элементов и узлов пневмоавтоматики и принципа их действия позволяют не только разобраться и понять работу известных устройств, но и при необходимости разрабатывать принципиально новые технические средства автоматизации.

Освоение дисциплины "Технические средства автоматизации" необходимо начать с изучения общих принципов построения Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП), классификации приборов и устройств, входящих в ГСП.

Терминология, принятая в пособии соответствует ГОСТ 16263–70 и ГОСТ 14691–69. Ниже приведены наиболее широко используемые термины и их определения:

*элемент* – простейшая составная часть устройств, приборов и других средств пневмоавтоматики, в которой осуществляется одно преобразование какой-либо величины;

*узел* – часть прибора, состоящая из нескольких более простых элементов (деталей);

*преобразователь* – устройство, преобразующее один вид сигнала в другой по форме или виду энергии;

*устройство* – совокупность некоторого числа элементов, соединенных между собой соответствующим образом, служащая для переработки информации;

*прибор* – общее название широкого класса устройств, предназначенных для измерений, производственного контроля, вычислений, учета, сбыта и др.;

*блок* – часть прибора, представляющая собой совокупность функционально объединенных элементов.

Изучение дисциплины "Технические средства автоматизации" базируется на теоретическом и практическом материале, содержащемся в курсах "Теоретическая электротехника", "Электроника", "Теория управления", "Высшая математика", "Физика".

Материал данной дисциплины используется при изучении курсов "Автоматизация технологических процессов", а также при выполнении курсовых и дипломных проектов.

## **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ АВТОМАТИЗАЦИИ**

---

---

Необходимость изучения общих вопросов, касающихся технических средств автоматизации (ТСА) и государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП), диктуется тем, что технические средства автоматизации являются неотъемлемой частью ГСП. Технические средства автоматизации представляют собой основу при реализации информационно-управляющих систем в промышленной и непромышленной сферах производства. Принципы организации ГСП в значительной мере определяют содержание этапа проектирования технического обеспечения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). В свою очередь, основу ГСП составляют проблемно-ориентированные агрегатные комплексы технических средств.

Типовые средства автоматизации могут быть техническими, аппаратными, программно-техническими и общесистемными [1].

К техническим средствам автоматизации (ТСА) относят:

- датчики;
- исполнительные механизмы;
- регулирующие органы (РО);
- линии связи;
- вторичные приборы (показывающие и регистрирующие);
- устройства аналогового и цифрового регулирования;
- программно-задающие блоки;
- устройства логико-командного управления;
- модули сбора и первичной обработки данных и контроля состояния технологического объекта управления (ТОУ);
- модули гальванической развязки и нормализации сигналов;
- преобразователи сигналов из одной формы в другую;
- модули представления данных, индикации, регистрации и выработки сигналов управления;
- буферные запоминающие устройства;
- программируемые таймеры;
- специализированные вычислительные устройства, устройства допроцессорной подготовки.

К программно-техническим средствам автоматизации относят:

- аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи;
- управляющие средства;
- блоки многоконтурного аналогового и аналого-цифрового регулирования;
- устройства многосвязного программного логического управления;
- программируемые микроконтроллеры;
- локально-вычислительные сети.

К общесистемным средствам автоматизации относят:

- устройства сопряжения и адаптеры связи;
- блоки общей памяти;
- магистрали (шины);
- устройства общесистемной диагностики;
- процессоры прямого доступа для накопления информации;
- пульты оператора.

## 1.1. Технические средства автоматизации в системах управления

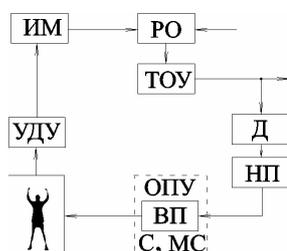
Любая система управления должна выполнять следующие функции:

- сбор информации о текущем состоянии технологического объекта управления (ТОУ);
- определение критериев качества работы ТОУ;
- нахождение оптимального режима функционирования ТОУ и оптимальных управляющих воздействий, обеспечивающих экстремум критериев качества;
- реализация найденного оптимального режима на ТОУ.

Эти функции могут выполняться обслуживающим персоналом или ТСА. Различают четыре типа систем управления (СУ):

- 1) информационные;
- 2) автоматического управления;
- 3) централизованного контроля и регулирования;
- 4) автоматизированные системы управления технологическими процессами.

*Информационные (неавтоматизированные) системы управления* (рис. 1.1) применяются редко, только для надежно функционирующих, простых технологических объектов управления ТОУ.



**Рис. 1.1. Структура информационной системы управления:**

Д – датчик (первичный измерительный преобразователь); НП – нормирующий преобразователь; ВП – вторичный показывающий прибор; ОПУ – операторский пункт управления (щиты, пульты, мнемосхемы, устройства сигнализации); УДУ – устройства дистанционного управления (кнопки, ключи, байпасные панели управления и др.); ИМ – исполнительный механизм; РО – регулирующий орган; С – устройства сигнализации; МС – мнемосхемы



Выход из строя одного канала регулирования не приводит к остановке технологического объекта. Такое построение увеличивает стоимость системы, но повышает ее надежность.

Система второго типа состоит из ТСА индивидуального и коллективного пользования. К ТСА коллективного пользования относят: коммутатор, КП, ЦР, МР, МПП.

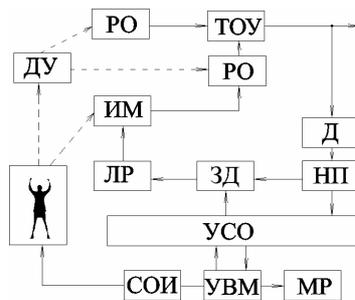
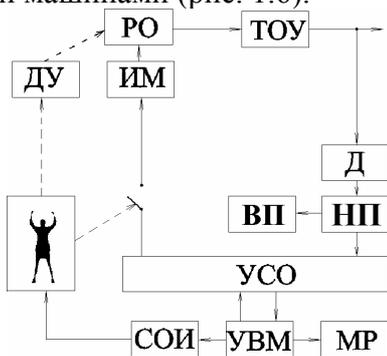
Стоимость коллективной системы несколько ниже, но надежность в сильной степени зависит от надежности коллективных ТСА.

При значительной длине линии связи применяют индивидуальные кодирующие и декодирующие преобразователи, размещенные около датчиков и исполнительных механизмов. Это повышает стоимость системы, но улучшает помехозащищенность линии связи.

*Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП)* (рис. 1.4) – это машинная система, в которой ТСА осуществляют получение информации о состоянии объектов, вычисляют критерии качества, находят оптимальные настройки управления. Функции оператора сводятся к анализу полученной информации и реализации с помощью локальных АСР или дистанционного управления РО.

Различают следующие типы АСУТП:

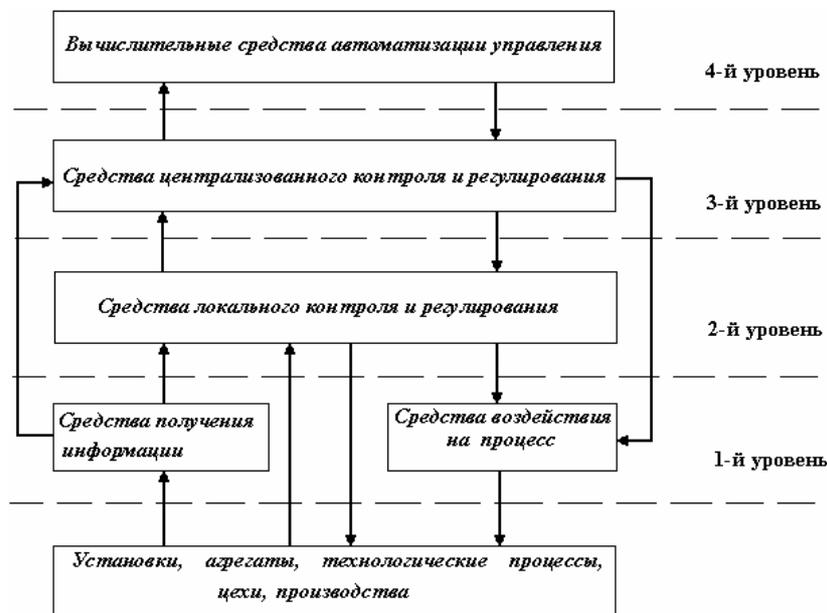
- централизованная АСУ ТП (все функции обработки информации и управления выполняет одна управляющая вычислительная машина УВМ) (рис. 1.4);
- супервизорная АСУТП (имеет ряд локальных АСР, построенных на базе ТСА индивидуального пользования и центральной УВМ (ЦУВМ), имеющей информационную линию связи с локальными системами) (рис. 1.5);
- распределенная АСУТП – характеризуется разделением функций контроля обработки информации и управления между несколькими территориально распределенными объектами и вычислительными машинами (рис. 1.6).



**Рис. 1.4. Структура централизованной АСУ ТП:**  
УСО – устройство связи с объектом;

ДУ – дистанционное управление; СОИ – средство отображения информации

**Рис. 1.5. Структура супервизорной АСУТП:**  
ЛР – локальные регуляторы



**Рис. 1.6. Иерархическая структура технических средств ГСП**  
**1.2. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРОМЫШЛЕННЫХ**  
**ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ (ГСП)**

### 1.2.1. Общие принципы построения ГСП

Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации основана на стандартных внутренних и внешних связях, рациональной структуре и конструктивных формах в модульно-блочном построении ее функциональных устройств и предусматривает их агрегатирование в комплексах измерительной, вычислительной, аналитической и других видов техники для построения систем информации, контроля, регулирования и управления

Реализация типовых функций АСУ ТП осуществляется в ГСП аппаратными средствами, иерархическая структура которых изображена на рис. 1.6. Средства 1-го уровня представляют собой локальные АСУ, включающие в себя датчики и исполнительные устройства. Средства 2-го и 3-го уровней выполняют функции программного управления, стабилизации режимов работы технологического объекта управления (ТОУ) и вывода на режим, включая ручное управление и программно-логическое. Задачи исследования ТОУ и оптимизации процесса управления решаются средствами 4-го уровня. С помощью этих же средств выполняются и функции представления информации и сервисные функции.

Исследования и оценка задач автоматизации в различных отраслях промышленности показывают [2, 3], что в настоящее время только в группе датчиков имеется потенциальный спрос на приборы для измерения более 2000 физических величин. Такое положение, с учетом известных методов измерений, диапазонов значений измеряемых величин и условий эксплуатации, может привести к необходимости изготовления нескольких десятков тысяч модификаций датчиков. Следовательно, одна из главнейших задач, решаемых комплексами ГСП, состоит в создании ограниченной номенклатуры унифицированных устройств, способных максимально удовлетворять потребности различных отраслей промышленности.

Сокращение номенклатуры средств автоматизации достигается объединением их в отдельные функциональные группы путем сведения функций этих устройств к ограниченному числу типовых функций. Оптимизация состава каждой группы обеспечивается разработкой *параметрических рядов изделий*. В основу ряда заложены более узкая специализация выполняемых функций (типизация инструментальных методик измерения или метода преобразования информации), ограничения по видам и параметрам сигналов, несущих информацию о контролируемой величине или команде управления, ограничения по техническим параметрам изделий, пределам измерений, классам точности, параметрам питания и т.д. и, наконец, унификация конструктивного исполнения изделий. Существенное сокращение числа функциональных различных устройств достигается обеспечением их *совместимости* в автоматизированных системах управления. Концепция совместимости, включающая в себя требования *информационного, энергетического, конструктивного, метрологического, эксплуатационного сопряжений между изделиями ГСП*, основана на последовательной унификации и стандартизации свойств и характеристик изделий.

Применительно к информационным связям термин "унификация" означает введение ограничений, налагаемых на сигналы, несущие сведения о контролируемой величине или команде. Унифицируются виды носителей нормированной информации (электрические – сигналы, коды и согласование входов и выходов; вещественные – с механическим носителем на перфокартах, перфолентах, бланках для записи и печати, с магнитными носителями). Определяется также способ представления информации в изделиях ГСП – аналоговый и дискретный.

Конструктивная совместимость изделий предусматривает, прежде всего, унификацию присоединительных размеров отдельных деталей и модулей, введение типовых узлов, создание единой элементной базы, разработку общих принципов конструирования приборов. При конструировании устройств ГСП принят *блочно-модульный принцип построения изделий*. Применение этого принципа делает приборы более универсальными, позволяет использовать при их создании рациональный минимум конструктивных элементов (сокращается количество наименований деталей). Вместе с тем возможность простой и легкой замены отдельных узлов позволяет модернизировать эти приборы в процессе эксплуатации, повышает их ремонтпригодность и расширяет круг решаемых ими задач (путем различных сочетаний функциональных звеньев и введением специализированных деталей). Блочно-модульное построение приборов позволяет широко применять при их изготовлении современную технологию и максимально использовать кооперацию и специализацию предприятий [3].

Стандартизируются также общие технические требования к изделиям ГСП и условиям их работы в автоматизированных системах управления. Ввиду многообразия производств и технологических процессов важное место отводится разделению приборов и устройств по группам условий эксплуатации. По защищенности от воздействия окружающей среды изделия ГСП подразделяются на следующие исполнения: обыкновенное, пылезащищенное, взрывозащищенное, герметическое, водозащищенное, защищенное от агрессивной среды. В зависимости от предполагаемых механических воздействий предусматривается обыкновенное и виброустойчивое исполнение.

Нормируются метрологические характеристики изделий (виды погрешностей, методы нормирования погрешностей отдельных устройств, погрешностей совокупности звеньев и систем, классы точности и методы аттестации). Этим достигается метрологическая совместимость.

Основные требования к изделиям ГСП, обеспечивающие их совместимость в автоматизированных системах управления, закреплены в государственных и отраслевых стандартах (см. ГОСТ 26.207–83).

### 1.2.2. Классификация приборов и устройств ГСП

Устройства ГСП по роду используемой вспомогательной энергии носителя сигналов в канале связи, применяемой для приема и передачи информации и команд управления, делятся на *электрические, пневматические и гидравлические* [2, 3]. В отдельных видах изделий ГСП могут быть использованы и другие виды энергии носителей сигналов (акустическая, оптическая, механическая и др.). В ГСП входят также устройства, работающие без использования вспомогательной энергии (приборы и регуляторы прямого действия).

Устройства, питающиеся при эксплуатации энергией одного рода, образуют структурную группу в Государственной системе приборов, или "ветвь ГСП".

АСУ ТП, комплектуемые из приборов электрической ветви, имеют преимущества по чувствительности, точности, быстродействию дальности связей, обеспечивают высокую схемную и конструктивную унификацию приборов. Применение интегральных микросхем способствует уменьшению габаритов и веса приборов, сокращению количества потребляемой ими энергии, повышению их надежности, расширению их функциональных возможностей (создание многофункциональных приборов), позволяет применять при их изготовлении современную прогрессивную технологию. Применение в АСУ ТП аналоговых и цифровых микросхем и микропроцессоров особенно важно в группе контрольно-измерительных приборов, так как обеспечивает возможность их непосредственной связи с ЭВМ [4].

Приборы пневматической ветви характеризуются безопасностью применения в легковоспламеняемых и взрывоопасных средах, высокой надежностью в тяжелых условиях работы, особенно при использовании в агрессивной атмосфере. Они легко комбинируются друг с другом. Однако пневматические приборы уступают электронным в тех случаях, когда технологический процесс требует больших быстродействий или передачи сигналов на значительные расстояния.

Гидравлические приборы позволяют получать точные перемещения исполнительных механизмов при больших усилиях.

### 1.2.3. Типовые конструкции и унифицированные сигналы ГСП

Одним из важнейших принципов, лежащих в основе построения ГСП, является требование конструктивного сопряжения устройств в системах контроля, регулирования и управления технологическими процессами. Высокая степень унификации достигнута в ряде групп изделий ГСП: в приборах для измерения температуры, датчиках теплоэнергетических параметров с силовой компенсацией, вторичных регистрирующих приборов серий КС, в исполнительных устройствах пневматической унифицированной системы СНУ и т.д.

В настоящее время разработан комплекс унифицированных типовых конструкций (УТК), обеспечивающий нормализацию габаритных и присоединительных размеров и введение типовых конструкций для изделий "центральной части" ГСП и некоторых периферийных устройств [1]. С учетом особенностей приборов различного функционального назначения УТК подразделяются на две части: общепромышленную и приборную.

*Общепромышленная часть* УТК служит для компоновки аппаратуры промышленной автоматики, технологических устройств, периферийных (для связи с объектом) средств управляющей вычислительной техники и других изделий ГСП, используемых в автоматизированных системах управления.

*Приборная часть* УТК предназначена для электроизмерительных и аналитических приборов, управляющей и вычислительной техники, испытательных установок и прочей аппаратуры.

При разработке обеих частей комплекса проектировщики руководствуются следующими принципами:

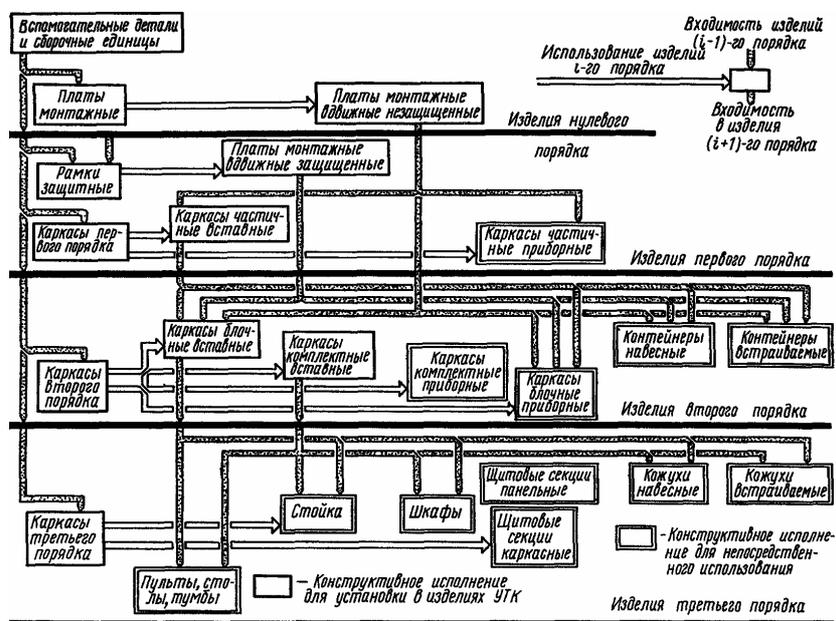
- максимальный учет основных положений ГСП: унификация, агрегатирование, совместимость;
- в номенклатуру УТК включается минимальное количество изделий (их типоразмеров и исполнений), необходимых для решения всех задач, соответствующих назначению комплекса;
- учитываются функциональное назначение каждого изделия, условия его эксплуатации и хранения, взаимосвязь с устройствами других функциональных групп в автоматизированных системах управления;
- предусматривается совместимость УТК с уже существующими изделиями.

Кроме того, учитывается необходимость большой динамичности разрабатываемого комплекса, обеспечивающей постоянное распространение области использования УТК на новые группы приборов. Одновременно соблюдается требование относительной устойчивости УТК, чтобы внедрение новых изделий не вызывало принципиальных изменений в других частях комплекса и, главное, не нарушало конструктивной совместимости изделий.

Структура описываемого комплекса УТК установлена ГОСТ 20504–81 (рис. 1.7). Условно типовые конструкции разделяют на категории нулевого, первого, второго и третьего порядков. Отношения, установленные между различными категориями (рис. 1.7), отражают современные принципы агрегатирования. Так, составные части изделий, выполненные на базе типовых конструкций низшего порядка, могут последовательно устанавливаться в любую из типовых конструкций более высокого порядка, образуя в конечном итоге конструктивно законченные приборы и устройства. Такая взаимозаменяемость обеспечивается согласованием размеров конструкций разного порядка.

Изделия УТК нулевого и первого порядков предназначены для построения унифицированных элементов (субблоков). Из элементов первого и второго порядков собираются функциональные блоки, из которых в свою очередь комплектуются изделия третьего порядка.

При монтаже изделий УТК обычно используются два способа компоновки: поступательное перемещение составных частей в одном, двух или трех взаимно перпендикулярных направлениях; поворот плоских или объемных составных частей вокруг одной или нескольких параллельных осей.



**Рис. 1.7. Структура комплекса унифицированных типовых конструкций ГСП**

В настоящее время в качестве основной номенклатуры УТК принята типовая конструкция монтажных подвижных плат, блочных и комплектных вставных каркасов, контейнеров, кожухов, шкафов, стационарных стоек, столов, секций щитов и пультов, а также частичные, блочные и комплектные каркасы (вставные и приборные), стационарные настольные и передвижные стойки.

Экономическая эффективность от внедрения УТК связана с уменьшением объема работ и сроков создания новых приборов, с увеличением серийности производства, сокращением сроков изготовления и снижения стоимости аппаратуры путем централизованного производства УТК. Сквозная унификация деталей и сборочных единиц во всем комплексе обеспечивает возможность модернизации АСУ ТП во время эксплуатации путем замены блоков, приборов и устройств на однотипные [3].

Унифицированный сигнал (УС) ГСП – это сигнал дистанционной передачи информации с унифицированными параметрами, обеспечивающий информационное сопряжение между блоками, приборами и установками ГСП.

Под унифицированным параметром УС ГСП понимается тот его параметр, который является носителем информации, а именно: значение постоянного или переменного тока или напряжения, или частоты, код, давление воздуха пневматического сигнала.

В зависимости от вида унифицированных параметров в ГСП применяют унифицированные сигналы четырех групп: 1) тока и напряжения электрические непрерывные; 2) частотные электрические непрерывные; 3) электрические кодированные; 4) пневматические.

Каждая группа УС ГСП определяется соответствующим государственным стандартом. В качестве примера в табл. 1.1 приведены основные виды унифицированных аналоговых сигналов ГСП.

### 1.1. Основные виды унифицированных аналоговых сигналов

Сигнал	Величина	
1 Электрический на постоянном токе	0...5 мА, 0...20 мА, -5...0...5 мА	
2 Электрический на постоянном напряжении	0...10 мВ	0...10 В
	0...20 мВ	0...1 В
	-10...0...10 мВ	-1...0...1 В
3 Электрический на переменном напряжении	0...2 В	
	0...1 В	
4 Электрические сигналы переменного тока на частоте	4... 8 кГц	
	2...4 кГц	
5 Пневматические сигналы	20...100 кПа (или 0,2...1,0 кгс/см <sup>2</sup> )	

## Вопросы для самостоятельной работы студентов

1. Какие средства автоматизации относят к техническим средствам?
  - а) датчики, исполнительные механизмы, линии связи;
  - б) вторичные приборы, программно-задающие блоки, управляющие средства, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи;
  - в) а) и б).
2. Какие средства автоматизации относят к программно-техническим средствам?
  - а) устройства логико-командного управления, модули сбора и первичной обработки данных и контроля состояния технологического объекта управления;
  - б) модули гальванической развязки и нормализации сигналов, преобразователи сигналов из одной формы в другую, блоки многоконтурного аналогового и аналого-цифрового регулирования, устройства многосвязного программного логического управления;
  - в) программируемые микроконтроллеры, локально-вычислительные сети.
3. Какие средства автоматизации относят к общесистемным?
  - а) устройства сопряжения и адаптеры связи, блоки общей памяти, магистрали (шины), устройства общесистемной диагностики, процессоры прямого доступа для накопления информации, пульта оператора;
  - б) вторичные приборы, программно-задающие блоки, управляющие средства, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи;
  - в) модули гальванической развязки и нормализации сигналов, преобразователи сигналов из одной формы в другую, блоки многоконтурного аналогового и аналого-цифрового регулирования, устройства многосвязного программного логического управления.
4. По роду используемой вспомогательной энергии носителя сигналов в канале связи устройства ГСП делятся на ...
  - а) электрические, пневматические и гидравлические;
  - б) акустические, оптические, механические;
  - в) а) и б).
5. Какой сигнал называется унифицированным?
  - а) сигнал определенной физической природы, изменяющийся в определенных фиксированных пределах независимо от вида измеряемой величины и метода измерения;
  - б) сигнал дистанционной передачи информации с унифицированными параметрами, обеспечивающий информационное сопряжение между блоками, приборами и установками ГСП;
  - в) а) и б).
6. В ГСП применяют унифицированные сигналы четырех групп:
  - а) тока и напряжения электрические непрерывные, частотные электрические непрерывные, электрические кодированные, пневматические;
  - б) тока и напряжения электрические непрерывные, частотные электрические непрерывные, механические, пневматические;
  - в) тока и напряжения электрические непрерывные, тепловые, частотные электрические непрерывные, электрические кодированные, пневматические, механические.
7. К какому уровню аппаратных средств автоматизации в ГСП относятся средства получения информации и средства воздействия на процесс?
  - а) 1-й уровень;
  - б) 2-й уровень;
  - в) 1-й и 2-й уровни.
8. Вычислительные средства автоматизации относятся к ТСА:
  - а) 1-й уровень;
  - б) 2-й уровень;
  - в) 1-й и 2-й уровни.
9. Входят ли в ГСП устройства, работающие без использования вспомогательной энергии?
  - а) да;
  - б) нет;
  - в) в некоторых случаях "да".
10. Какие супервизорные устройства образуют ветвь ГСП?
  - а) обладающие единой конструкцией;

- б) питающиеся при эксплуатации энергией одного рода;
  - в) имеющие выходной сигнал в виде энергии одного рода.
11. Гидравлические приборы позволяют получать:
- а) точные перемещения исполнительных механизмов при больших усилиях;
  - б) большие перемещения при малых усилиях;
  - в) большое быстродействие при выполнении соответствующих операций.

## 2. АНАЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

---

---

### 2.1. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ

Так как для измерения электрических величин уже введены единицы, то необходимо ввести соответствующие единицы и для измерения величин пневмоавтоматики низкого давления.

При сравнении электрических и пневматических цепей нетрудно установить аналогию между их свойствами [5]. В табл. 2.1 приводятся обозначения некоторых величин пневмоавтоматики с указанием единиц измерения.

### 2.2. ЗАКОН ОМА В ПНЕВМАТИКЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Из электротехники известно, что сила постоянного тока  $I$ , протекающего по проводнику, прямо пропорциональна разности потенциалов между конечными точками проводника и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению. Эта зависимость выражается законом Ома

$$I = \frac{U}{R}.$$

Если в пневматическую линию включить ламинарное пневматическое сопротивление, что через него в единицу времени проходит определенное количество воздуха. Если увеличить сопротивление, например, посредством увеличения длины канала в два раза, то количество воздуха, проходящее в единицу времени, сократится наполовину.

Следовательно, можно сказать, что закон Ома справедлив и для пневматических цепей, работающих в области ламинарных течений. В этом случае закон Ома для пневматических цепей можно представить в виде

$$G = \frac{\Delta P}{R} = \alpha \Delta P,$$

где  $G$  – массовый расход газа;  $\Delta P$  – перепад давлений на пневматическом сопротивлении  $R$ ;  $\alpha = \frac{1}{R}$  – проводимость.

### 2.3. ПРАВИЛА (ЗАКОНЫ) КИРХГОФА

При дальнейшем рассмотрении аналогий между электрическими и пневматическими цепями необходимо обратиться к правилам Кирхгофа, которые устанавливают соотношение между силами токов и напряжениями в разветвленных электрических цепях в состоянии их равновесия.

Согласно первому правилу (закону) Кирхгофа, относящемуся к точке разветвления токов, сумма токов притекающих к любому узлу, равна сумме токов, вытекающих из этого узла:

$$I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

## 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 пропорциональна разности потенциалов на его концах: $I \sim (\varphi_1 - \varphi_2),$ $I = \frac{1}{R}(\varphi_1 - \varphi_2)$	Величина расхода газа через капилляр пропорциональна разности давлений на его концах: $G \sim (P_1 - P_2),$ $G = \alpha(P_1 - P_2)$
Обобщенный закон Ома	Сила тока на участке цепи, где имеется источник эдс, пропорциональна сумме разности потенциалов на его концах и эдс: $I \sim (U_1 - U_2 + E),$ $I = \frac{1}{R}(U_1 - U_2 + E)$	Величина расхода газа через капилляр пропорциональна сумме разности давлений на его концах и расходу источника газа: $G \sim (P_1 - P_2) + G_{\text{и}},$ $G = \alpha(P_1 - P_2) + G_{\text{и}}$
Первый закон (правило) Кирхгофа	Алгебраическая сумма сил токов на участках цепи, сходящихся в узле, равна нулю: $\sum_{i=1}^n I_i = 0$	Алгебраическая сумма расходов газа в узле равна нулю: $\sum_{i=1}^n G_i = 0$
Второй закон (правило) Кирхгофа	Токи обратно пропорциональны соответствующим сопротивлениям: $I_1 : I_2 : \dots : I_n = R_n : \dots : R_2 : R_1$	Расходы обратно пропорциональны соответствующим сопротивлениям: $Q_1 : Q_2 : \dots : Q_n = R_n : \dots : R_2 : R_1$

Для пневмоавтоматики это соотношение можно записать соответственно

$$G_{\text{общ}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n.$$

По второму правилу (закону) Кирхгофа токи обратно пропорциональны соответствующим сопротивлениям. Для разветвленных цепей действительны формулы

$$I_1 : I_2 : I_3 : \dots : I_n = R_n : \dots : R_3 : R_2 : R_1$$

и соответственно для пневматики

$$G_1 : G_2 : G_3 : \dots : G_n = R_n : \dots : R_3 : R_2 : R_1 .$$

Дифференцируя уравнение Менделеева–Клапейрона и учитывая, что

$$\begin{aligned} G_3 = G_1 - G_2 &= \alpha(P_1 - P_V) - \beta(P_V - P_{\text{атм}}) = \\ &= \alpha P_1 + \beta P_{\text{атм}} - P_V (\alpha + \beta), \end{aligned}$$

получим

$$\tau \frac{dP_{\text{Вых}}}{dt} + P_{\text{Вых}} = KP_1, \quad \tau = \frac{V}{(\alpha + \beta)RT}, \quad K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} .$$

### Вопросы для самостоятельной работы студентов

1. Какое из представленных выражений является аналитической записью закона Ома для пневматических цепей?

а)  $G = \frac{\Delta P}{R}$ ; б)  $G = \Delta PR$ ; в)  $G = \frac{R}{\Delta P}$ .

2. Определите размерность пневматического сопротивления  $R$  для массового расхода газа через него:

а) м/с; б) м·с; в) (м·с)<sup>-1</sup>.

3. На какое пневматическое соединение распространяется действие 1-го закона Кирхгофа:

а) ветвь; б) узел; в) дерево.

4. Определите размерность пневматического сопротивления  $R$  для объемного расхода газа через него:

а) Н·с/м; б) Н·с/м<sup>5</sup>; в) Н·м/с.

5. Сформулируйте 2-ой закон Кирхгофа для пневматических цепей.

## 3. ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ

---

Пневматические сопротивления и емкости являются одними из основных элементов пневмоавтоматики. Изучение данной темы необходимо начать с классификации пневматических сопротивлений в зависимости от режима течения газа и функционального назначения.

При изучении расходных характеристик ламинарных и турбулентных дросселей необходимо выяснить влияние температуры газа, его динамической вязкости и плотности на величину их сопротивления.

В пневмоавтоматике, как и в электронике, применяют различные соединения сопротивлений. При расчете различных соединений пневматических сопротивлений необходимо определить связь между перепадом давлений и расходом газа.

Процессы, происходящие в пневматических камерах в динамическом режиме работы, описываются соответствующими дифференциальными уравнениями. Знания динамики и статики пневматических камер необходимы при анализе и синтезе различных технических средств автоматизации.

### 3.1. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ

Пневмоавтоматика охватывает технические средства регулирования, управления и контроля, использующие в работе различные эффекты газовой динамики. В историческом развитии технических средств пневмоавтоматики можно проследить четыре поколения.

*Первое поколение* – универсальные регуляторы приборного типа. До 40-х годов XX столетия задачей автоматизации являлась стабилизация отдельных параметров. Эта задача успешно решалась крупногабаритными техническими средствами, совмещающими в едином корпусе измерительную систему, показывающее, регистрирующее, задающее и регулирующее устройства. Объединение всех функций в единой конструкции в те времена было достоинством – так существенно упрощались монтаж и обслуживание. Основной недостаток – узкие функциональные возможности, ограничивающие их применение.

Развитие промышленности, сопровождающееся усложнением технологических процессов, привело к необходимости создавать многоконтурные и взаимосвязанные системы регулирования.

*Второе поколение* – регуляторы, реализующие агрегатную структуру по принципу компенсации усилий.

В 50-х годах XX столетия был разработан и стал широко применяться агрегатный принцип построения средств пневмоавтоматики. Системы управления, реализация которых осуществлялась с помощью стандартных блоков и устройств, выполнявших определенные функции: измерение, регистрацию, установку задания, формирование регулирующего воздействия, суммирование, умножение на постоянный коэффициент и др. Система технических средств, реализующая агрегатный принцип, известна как агрегатная унифицированная система АУС.

Регулирующие и функциональные блоки АУС представляли собой жесткую единую конструкцию, состоящую из однотипных цилиндрических шайб с проложенными между ними мембранами из прорезиненного полотна, и работали по принципу компенсации усилий. Усилие, поступающее на вход устройства, компенсировалось усилием, создаваемым давлением воздуха на выходе.

Принцип компенсации усилий в отличие от принципа компенсации перемещений позволил строить регулирующие и функциональные блоки так, что их работа практически не сопровождается механическими перемещениями.

Агрегатная унифицированная система АУС считается одной из первых систем технических средств автоматизации в рамках ГСП.

Блоки АУС взаимозаменяемы, просты в обслуживании и могут работать с любыми измерительными преобразователями, имеющими стандартный пневматический выходной сигнал.

*Третье поколение* – универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА).

Для построения систем пневмоавтоматики в 60-х годах стал использоваться элементный и блочно-модульный принцип. При этом любое новое устройство собиралось путем коммуникации пневматических элементов универсального назначения. Элементы унифицированы. Однотипные элементы могут многократно применяться в одной схеме и в схемах различных приборов.

Набор элементов УСЭППА является функционально полным, т.е. включает в себя элементы, достаточные для построения любого управляющего устройства непрерывного действия, любой релейной схемы и управляющего устройства непрерывно-дискретного действия.

Элементы УСЭППА просты по конструкции и по технологии изготовления и сравнительно компактны. Они достаточно дешевы, просты в наладке и имеют унифицированное расположение входов и выходов.

*Четвертое поколение* – струйная пневмоавтоматика (пневмоника, флюидика).

Дальнейшее развитие пневмоавтоматики привело к созданию струйного принципа построения элементов и модулей. В качестве носителя энергии в струйных элементах используется воздух, в связи с чем струйную технику называли пневмоникой.

Элементы пневмоники обладают высоким быстродействием и малыми габаритами. Элементы не содержат подвижных изнашивающихся деталей, изготавливаются прогрессивным методом печатного монтажа. По этому методу струйные элементы и коммуникационные каналы между ними получают в виде углублений в плоских пластинах, что дает возможность использовать такие высокопроизводительные процессы, как штамповка, пресслитье, фототравление.

Схемы, реализованные на элементах пневмоники, имеют небольшие габариты и обладают большим быстродействием, чем схемы, построенные на мембранных элементах.

Однако широкое внедрение элементов пневмоники в промышленности затрудняется, во-первых, из-за низкого уровня входных и выходных сигналов, во-вторых, из-за невысокой помехоустойчивости. Чтобы использовать положительные качества струйных элементов и избежать отрицательных, применяют

комбинированную струйно-мембранную технику. В этом случае выходной сигнал струйной системы подается на мембранный усилитель, усиливающий выходной сигнал как по давлению, так и по мощности.

### 3.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ, ЕМКостей И КАМЕР

Пневматические сопротивления и емкости являются одними из основных элементов пневмоавтоматики. На этих элементах строятся разнообразные пневматические устройства контроля и управления [6 – 9].

В пневмоавтоматике, как и в электронике, применяют различные соединения сопротивлений. При расчете различных соединений пневматических сопротивлений необходимо определить связь между перепадом давлений и расходом газа.

Пневматические сопротивления (ПС) применяют для создания местного сопротивления потоку воздуха и изменения его расхода  $G$ . Пневматические сопротивления разделяют на постоянные, регулируемые вручную и переменные. В постоянных ПС типа жиклер и капилляр (рис. 3.1, а, б) площадь  $F$  проходного сечения неизменна. Постоянные нерегулируемые ПС выполняют в виде капилляров с отверстиями диаметром 0,32 или 0,18 мм. В регулируемых ПС типа конус-конус, цилиндр-цилиндр, шарик-цилиндр и переменных дросселях типа сопло-заслонка (рис. 3.1, в, з, д, е) площадь  $F$  изменяют вручную или каким-либо техническим устройством. Статические характеристики пневматических сопротивлений  $G = f(P_1, P_2, F)$  обычно нелинейные, но при малом перепаде давления  $\Delta P = P_1 - P_2$  их можно линеаризовать в виде  $G \approx \alpha(P_1 - P_2)$ , где  $\alpha$  – коэффициент проводимости дросселя. Такая

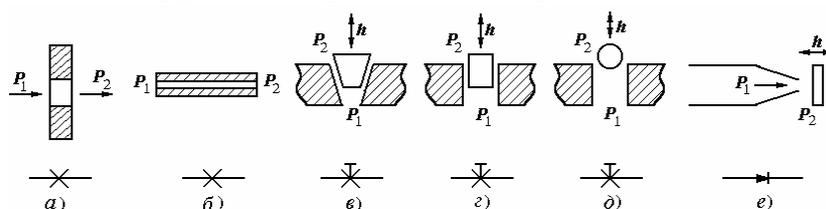


Рис. 3.1. Схемы пневматических сопротивлений и условные обозначения:

а – жиклер; б – капилляр; в – конус-конус; г – цилиндр-цилиндр;  
д – шарик-цилиндр; е – сопло-заслонка

линеаризация справедлива для пневматических сопротивлений с ламинарным режимом течения газа при  $\Delta P \leq (20 \dots 30)$  кПа, для остальных –  $\Delta P \leq (10 \dots 20)$  кПа.

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

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

В турбулентных пневматических сопротивлениях 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.

К пневматическим сопротивлениям 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 пневматического сопротивления определяет зависимость массового расхода газа через сопротивление от перепада давления на нем. По виду расходной характеристики пневматические сопротивления могут быть линейными и нелинейными.



емкости предназначены для накопления сжатого воздуха. Их применяют при осуществляющих различные временные операции (интегрирование, дифференцирование и т.д.) емкости при постоянном объеме увеличение количества газа приводит к увеличению давления. Емкость с клапаном служит постоянной или переменной емкостью.

Рис. 3.2. Схема

постоянным объемом показана на рис. 3.2, а, условное обозначение емкости в схемах пневматических средств автоматизации изображено на рис. 3.2, б. Постоянная емкость представляет собой полый жесткий цилиндр, ограничивающий объем  $V$ , а регулируемая емкость содержит сильфон, объем  $V$  которого изменяется вручную.

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

### 3.3. 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 [9].

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

$$dP + \rho U dU = 0.$$

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

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

В соответствии с уравнением сохранения энергии, изменение полной энергии объема газа равно сумме работ в единицу времени внешних массовых и поверхностных сил. Указанные силы приложены к этому объему и его поверхности и сложены с отнесенной к единице времени теплотой, подведенной извне. Если к 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

$$T = \text{const}.$$

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

$$f(T, P, V) = 0.$$

Связь между параметрами идеального газа определяется уравнением Менделеева–Клапейрона

$$PV = \frac{M}{\mu} RT \quad \text{или} \quad PV = NkT.$$

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 не 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 приведенных выше уравнений, записанных для двух произвольных сечений трубопровода, расположенных на некотором расстоянии  $l$ , можно определить массовый расход газа

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

где  $d, l$  – диаметр и длина отрезка трубопровода;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

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

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}},$$

где  $\text{Re} = \frac{Ud\rho}{\eta} = \frac{4G}{\pi d\eta}$  – критерий Рейнольдса;  $\eta$  – динамическая вязкость газа, Па·с. С учетом этого, массовый расход газа запишем в виде

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

Эта зависимость носит название формулы Пуазейля для газов и используется для определения его расхода через капилляр при ламинарном течении.

При малых перепадах давлений формулу Пуазейля можно представить в виде

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

где  $\alpha$  – проводимость ламинарного дросселя,  $\alpha = \frac{\pi d^4 \rho}{128\eta\ell}$ , м·с;  $\rho$  – 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 вида

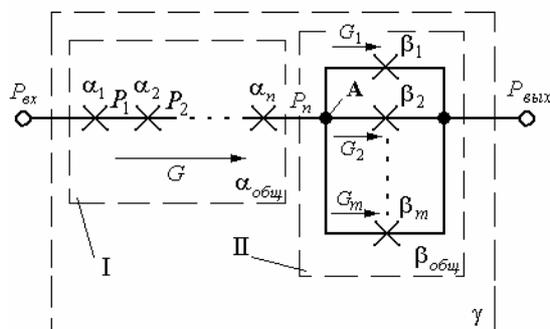
$$G = \alpha_p \varepsilon F \sqrt{2\rho_1 (P_1 - P_2)}.$$

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

### 3.4. Последовательное и параллельное соединение дросселей

При анализе и синтезе устройств пневмоавтоматики часто возникают задачи оценки общей проводимости цепи составленной из многих пневматических сопротивлений, соединенных различным образом. В этом случае, в силу аналогии между пневматическими и электрическими величинами, справедливы все известные методы расчета электрических цепей.

Итак, рассчитаем пневматическую цепь (рис. 3.3), используя закон Ома для участка цепи и первое правило Кирхгофа. Для определения



**Рис. 3.3. Расчетная схема для смешанного соединения пневматических сопротивлений**

общей проводимости  $\gamma$  рассмотрим два участка цепи с проводимостями  $\alpha_{\text{общ}}$  и  $\beta_{\text{общ}}$ . Первый участок представляет собой последовательное соединение дросселей  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ , второй участок – параллельное соединение дросселей  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ .

Расход воздуха  $G$  во всех частях участка I одинаков. Аналогично закону Ома получаем:

$$\begin{cases} P_{\text{вх}} - P_1 = \frac{G}{\alpha_1}; \\ P_1 - P_2 = \frac{G}{\alpha_2}; \\ \vdots \\ P_{n-1} - P_n = \frac{G}{\alpha_n}. \end{cases} \quad (3.1)$$

Сложив уравнения системы (3.1), получим

$$P_{\text{вх}} - P_n = \frac{G}{\alpha_1} + \frac{G}{\alpha_2} + \dots + \frac{G}{\alpha_n},$$

откуда после преобразования имеем

$$G = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \dots + \frac{1}{\alpha_n}} (P_{\text{вх}} - P_n).$$

Таким образом, первый множитель в правой части полученного уравнения представляет собой общую проводимость цепи, составленной из  $n$  последовательно соединенных пневматических сопротивлений, т.е.

$$\alpha_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \dots + \frac{1}{\alpha_n}}.$$

Рассмотрим участок II пневматической цепи. Согласно первому правилу Кирхгофа, относящемуся к точке разветвления токов, сумма токов, притекающих к любому узлу, равна сумме токов, утекающих из этого узла.

Для узла А (рис. 3.3) имеем

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_m.$$

В соответствии с законом Ома для пневматической цепи запишем

$$\beta_{\text{общ}} (P_n - P_{\text{вых}}) = \beta_1 (P_n - P_{\text{вых}}) + \beta_2 (P_n - P_{\text{вых}}) + \dots + \beta_m (P_n - P_{\text{вых}}),$$

откуда для общей проводимости цепи, составленной из  $m$  параллельно соединенных пневматических сопротивлений имеем

$$\beta_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^m \beta_i.$$

Таким образом, пневматическая цепь, представленная на рис. 3.3, может быть рассмотрена как цепь, состоящая из двух последовательно соединенных пневматических сопротивлений с проводимостями  $\alpha_{\text{общ}}$  и  $\beta_{\text{общ}}$ . В соответствии с изложенным проводимость  $\gamma$  определим в виде

$$\gamma = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{общ}}} + \frac{1}{\beta_{\text{общ}}}} = \frac{\alpha_{\text{общ}} \beta_{\text{общ}}}{\alpha_{\text{общ}} + \beta_{\text{общ}}}.$$

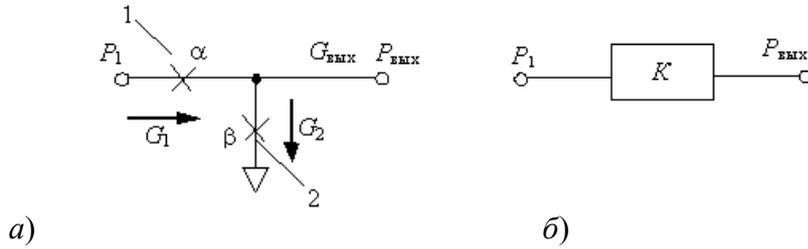
### 3.5. УСТРОЙСТВА, ПОСТРОЕННЫЕ НА ДРОССЕЛИРУЮЩИХ И НАКОПИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Рассмотрим работу дроссельного устройства, построенного на двух дросселях 1 и 2 (рис. 3.4) с проводимостями  $\alpha$  и  $\beta$ , соответственно. На дроссель 1 подается входное давление  $P_1$ , а выход 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. существует так называемый потенциальный выход.

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

$$\begin{cases} G_1 = \alpha (P_1 - P_{\text{вых}}), \\ G_2 = \beta (P_{\text{вых}} - P_{\text{атм}}). \end{cases} \quad (3.2)$$



**Рис. 3.4. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного делителя**

В междроссельной камере в установившемся режиме не происходит накопления воздуха, поэтому для нее справедливо первое правило Кирхгофа, которое для данной схемы формулируется так: в установившемся режиме сумма входящих расходов равна сумме выходящих:

$$G_1 = G_2 + G_{\text{вых}}. \quad (3.3)$$

Так как  $G_{\text{вых}} = 0$ , то, решая (3.2), получим

$$P_{\text{вых}} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} P_1 = KP_1,$$

где  $K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$ .

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 пневматической камеры, собранной из двух дросселей и емкости (рис. 3.5).

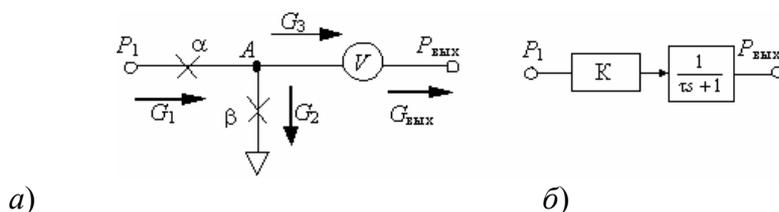
Для ламинарных дросселей справедлива линейная зависимость между перепадом давления на дросселе и расходом газа через него:

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

Для узла схемы (точка А) сумма входящих расходов равна сумме выходящих расходов (первое правило Кирхгофа). В устройстве накопление газа происходит в емкости  $V$ , а стравливание происходит через дроссель  $\beta$ :

$$G_1 = G_2 + G_3.$$

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



**Рис. 3.5. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного делителя с междроссельной емкостью**

Состояние газа в емкости описывается уравнением Менделеева–Клапейрона:

$$P_{\text{ВЫХ}} V = \theta RT.$$

Осуществим математическое описание процессов, происходящих в рассматриваемом устройстве. Расход  $G_3$  поступает в емкость  $V$  и увеличивает количество  $\theta$  газа в ней. Найдем зависимость между расходом и количеством газа. Расход  $G_3$  – переменный вследствие роста давления  $P_{\text{ВЫХ}}$ . Выделим такой промежуток времени  $\Delta t$ , в который можно считать, что расход  $G_3$  постоянен. Тогда за промежуток времени  $\Delta t$  при величине расхода  $G_3$  количество газа увеличивается и станет равным

$$\Delta\theta = G_3\Delta t \quad \text{или} \quad \Delta\theta/\Delta t = G_3.$$

После дифференцирования уравнения Менделеева–Клапейрона с учетом того, что

$$G_3 = G_1 - G_2 = \alpha(P_1 - P_V) - \beta(P_V - P_{\text{атм}})$$

получается дифференциальное уравнение

$$\tau \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} + P_{\text{ВЫХ}} = KP_1, \quad \tau = \frac{V}{(\alpha + \beta)RT}, \quad K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}.$$

При  $P_1(t) = P_0 \cdot 1(t)$  и  $P_{\text{ВЫХ}}(0) = 0$  решением дифференциального уравнения является  $P_{\text{ВЫХ}}(t) = KP_0 \left( 1 - \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \right)$ .

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 (рис. 3.5, б), постоянная времени которого пропорциональна объему емкости и обратно пропорциональна сумме проводимостей дросселей.

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

Если в дроссельном делителе (рис. 3.4) дроссель  $\beta$  вместо атмосферы соединить с давлением  $P_2$ , то получим дроссельный сумматор (рис. 3.6).

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

$$G_1 = \alpha(P_1 - P_{\text{ВЫХ}}), \quad G_2 = \beta(P_2 - P_{\text{ВЫХ}}), \quad G_1 + G_2 = G_{\text{ВЫХ}} = 0,$$

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

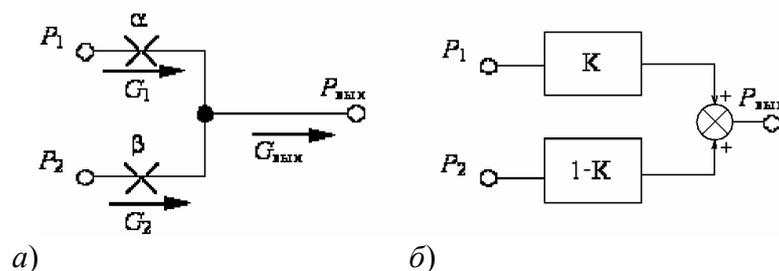
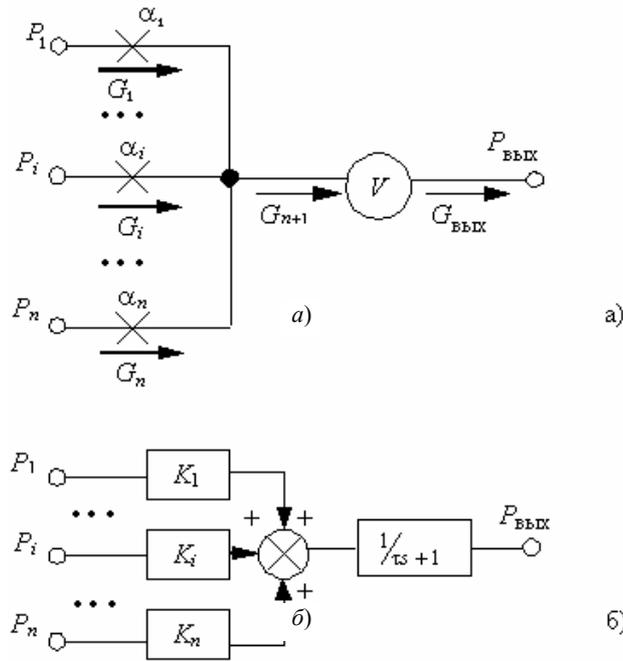


Рис. 3.6. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного сумматора

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

Рассмотрим дроссельный сумматор, имеющий  $n$  входов, нагруженный на емкость  $V$  (рис. 3.7).



**Рис. 3.7. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного сумматора с  $n$  входами и емкостью**

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

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

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

откуда

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

В этом случае получаем аналогичное дифференциальное уравнение и передаточную функцию, что и для дроссельного сумматора на два входа.

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

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

Выходной сигнал определяется по формуле

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

Проведем анализ устройства, построенного с использованием независимых накопительных элементов (пневматических емкостей) (рис. 3.8).

Процессы, протекающие в устройстве, описываются следующими уравнениями:

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

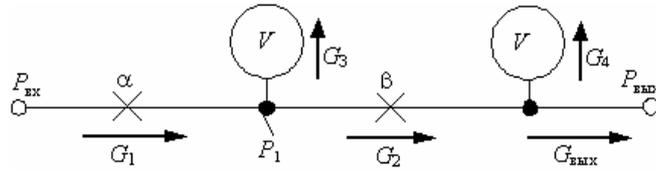
$$G_1 = G_2 + G_3; \quad G_2 = G_4 + G_{\text{ВЫХ}}; \quad G_{\text{ВЫХ}} = 0;$$

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

откуда получаем дифференциальное уравнение, описывающее изменение выходного сигнала устройства во времени:

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

$$\text{где } \tau_1 = \frac{V}{RT(\alpha + \beta)}, \quad \tau_2 = \frac{V}{RT\beta}.$$



**Рис. 3.8.** Принципиальная схема пневматического инерционного звена второго порядка

Процессы, протекающие в устройстве, имеющем в своем составе два последовательно соединенных независимых накопителя воздуха, описываются дифференциальным уравнением второго порядка. Две емкости (рис. 3.8), последовательно соединенные через дроссель β, являются независимыми накопителями, так как они не могут быть преобразованы в один накопитель.

Вид решения дифференциального уравнения

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

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. 3.1.

### 3.6. Конструкции типовых элементов и звеньев пневмоавтоматики

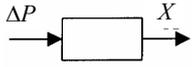
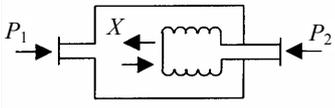
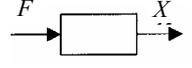
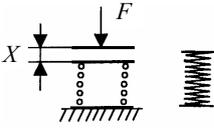
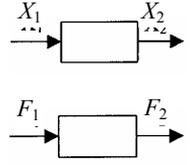
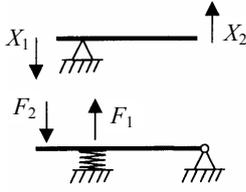
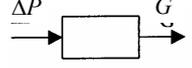
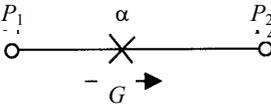
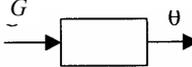
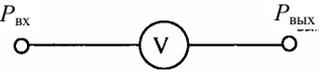
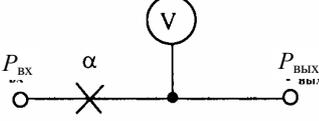
Конструкции других типовых элементов и звеньев, используемых в пневмоавтоматике, и их математическое описание приведены в табл. 3.2.

### 3.2. Конструкции типовых элементов и звеньев пневмоавтоматики

Название элемента или устройства. Условное изображение	Конструкция элемента или устройства	Математическое описание элемента или устройства
		$F = F_1 - F_2 = S_0(P_1 - P_2);$ $W(s) = S_0$

Продолжение табл. 3.2

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

<p>Сильфон</p> 		$W(s) = \frac{F_3 / K_c}{\tau_2 s^2 + \tau_1 s + 1};$ $x = \frac{F_3}{K_c} (P_1 - P_2)$
<p>Пружина</p> 		$x = \frac{F}{K_n};$ $W(s) = \frac{1 / K_n}{\tau_2 s^2 + \tau_1 s + 1}$
<p>Рычаг</p> 		$x_2 = Kx_1; \quad F_2 = KF_1;$ $W(s) = K$
<p>Дроссель</p> 		$G = \alpha (P_1 - P_2);$ $W(s) = \alpha$
<p>Пневмоемкость</p> 		$P_{\text{ВЫХ}} V = \theta RT$
<p>Пневмокамера</p> 		$W(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$

### Вопросы для самостоятельной работы студентов

- По виду расходной характеристики турбулентные пневматические сопротивления относятся к ...
  - линейным;
  - нелинейным;
  - пропорциональным;
  - смешанным.
- Потери давления на пневматических сопротивлениях смешанного типа определяются ...
  - местными потерями;
  - трением воздуха о стенки канала;
  - местными потерями и трением воздуха о стенки канала.
- Пневматические сопротивления с турбулентным режимом течения газа по ним выполняются в виде ...
  - цилиндрического канала с малым отношением длины к диаметру;
  - цилиндрического канала с большим отношением длины к диаметру;
  - в виде устройства сопло-заслонка;
  - в виде устройства шарик-седло.
- С какой целью используют в пневматических цепях пневматическую емкость?
  - для накопления сжатого воздуха;
  - для создания дополнительного сопротивления протекающему воздуху;

- в) для очистки воздуха от пыли и влаги;
- г) а) и б).

5. Какое из приведенных уравнений является формулой Пуазейля?

а)  $G = \frac{\pi d^4 (P_1^2 - P_2^2)}{128 \eta l}$ ;

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

в)  $G = \frac{\pi d^4 (P_1^2 - P_2^2) \rho_r}{128 \eta l}$ .

6. Для цепи из последовательного соединения пневматических сопротивлений общее сопротивление определяется в виде ...

- а) суммы пневматических сопротивлений, составляющих цепь;
- б) суммы проводимостей участков цепи;
- в) произведения пневматических сопротивлений;
- г) произведения проводимостей.

7. Для цепи в виде параллельного соединения пневматических сопротивлений общая проводимость определяется ...

- а) суммой проводимостей участков цепи;
- б) разностью проводимостей участков цепи;
- в) произведения проводимостей участков цепи;
- г) отношением проводимостей участков цепи.

8. Пневматическая камера представляет собой ...

- а) параллельное соединение пневматических емкостей;
- б) последовательное соединение пневматических емкостей;
- в) соединение пневматических сопротивлений и емкостей;
- г) смешанное соединение пневматических сопротивлений.

9. Чем определяется порядок дифференциального уравнения, описывающего процессы в пневматической камере?

- а) количеством пневматических емкостей;
- б) количеством пневматических сопротивлений;
- в) количеством независимых пневматических накопительных элементов (емкостей);
- г) количеством пневматических сопротивлений и емкостей.

10. Динамика проточной пневматической камеры с давлениями на входах  $P_1$  и  $P_2 = P_{атм}$ , содержащей емкость  $V$  и два пневматических сопротивления  $\alpha$  и  $\beta$ , описывается дифференциальным уравнением

а)  $\tau \frac{dP_{вых}}{dt} = kP_1$ ;

б)  $\tau \frac{dP_{вых}}{dt} + P_{вых} = kP_1$ ;

в)  $\tau \frac{dP_{вых}}{dt} + P_{вых} = kP_2$ .

## 4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ВЕТВИ ГСП

В пневматической ветви ГСП используется унифицированный сигнал – давление сжатого воздуха в диапазоне  $0,2 \cdot 10^5 \dots 1,0 \cdot 10^5$  Па. Это позволяет соединять различные приборы и регуляторы без дополнительного согласования их входных и выходных сигналов.

Промежуточные преобразователи предназначены для преобразования механических выходных сигналов датчиков (силы, перемещения) в унифицированные промежуточные сигналы. Кроме этого, они осуществляют преобразования неунифицированных электрических сигналов датчиков (электрическое сопротивление, ЭДС) в унифицированные электрические сигналы, а также преобразования унифицированных пневматических сигналов в унифицированные электрические и наоборот.

Наибольшее распространение получили промежуточные преобразователи первой группы, поскольку большинство датчиков для измерения таких распространенных технологических параметров, как давление, уровень и расход, имеют механический выходной сигнал. Промежуточные преобразователи этой группы всегда составляют с датчиком одно устройство.

Преобразователи второй группы обычно применяют с датчиками температуры в случаях, когда сигнал необходимо передавать на устройство, имеющее только унифицированный вход, например КИУС (компьютерное измерительно-управляющее устройство).

Преобразователи третьей группы позволяют переходить от пневматической ветви ГСП к электрической и наоборот. Такой переход обычно необходим при управлении технологическими процессами, которые ведутся в пожаро- и взрывоопасных условиях. Если управление таким процессом ведется с помощью локальных АСР, то применяют элементы пневматической ветви ГСП или электрические, конструкция которых позволяет применять их во взрывоопасных помещениях. Если же используется АСУ ТП, то сигналы из цеха к УВМ и от УВМ в цех передаются через пневмоэлектрические и электропневматические промежуточные преобразователи.

Промежуточный преобразователь представляет собой комбинацию элементарных преобразователей, обеспечивающую заданные метрологические характеристики: погрешность, стабильность, линейность, чувствительность. В большинстве преобразователей используется наиболее точный метод измерения – нулевой. Поэтому промежуточные преобразователи, как правило, представляют собой астатические следящие системы или статические с глубокой обратной связью.

Все промежуточные преобразователи пневматической ветви ГСП имеют одинаковый выходной унифицированный сигнал – давление сжатого воздуха от  $0,2 \cdot 10^5$  до  $1,0 \cdot 10^5$  Па. Среди промежуточных преобразователей с электрическим выходом наибольшее распространение получили преобразователи с выходным сигналом в виде постоянного тока, изменяющегося от 0 до 5 или от 4 до 20 мА. Такой выходной сигнал позволяет к одному промежуточному преобразователю подключить последовательно несколько потребителей: измерительные приборы, регуляторы, компьютерные системы централизованного контроля и управления.

### 4.1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИЛЫ В ДАВЛЕНИЕ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Входным сигналом преобразователя является сила  $F$ , приложенная к левому плечу рычага  $a$ , а выходным – давление сжатого воздуха  $p$  на выходе усилителя мощности.

На рис. 4.1, б приведена структурная схема преобразователя, из которого видно, что его можно представить в виде последовательного соединения двух преобразователей: преобразователя измеряемой силы  $F$  в момент  $M$  (приложенный к рычагу  $l$  и преобразователя этого момента в выходное давление  $p$ . Второй преобразователь представляет собой следящую систему, в которой обратным преобразователем является сильфон  $b$  вместе с правым плечом рычага  $b$ . Рычаг одновременно выполняет функции преобразования приложенных к нему сил  $F$  и  $F_M$  в моменты  $M$  и  $M_M$  (преобразователи  $a$  и  $b$ ), вычитания этих моментов (сумматор С) и интегратора разности  $(M - M_M)$  этих моментов (И).

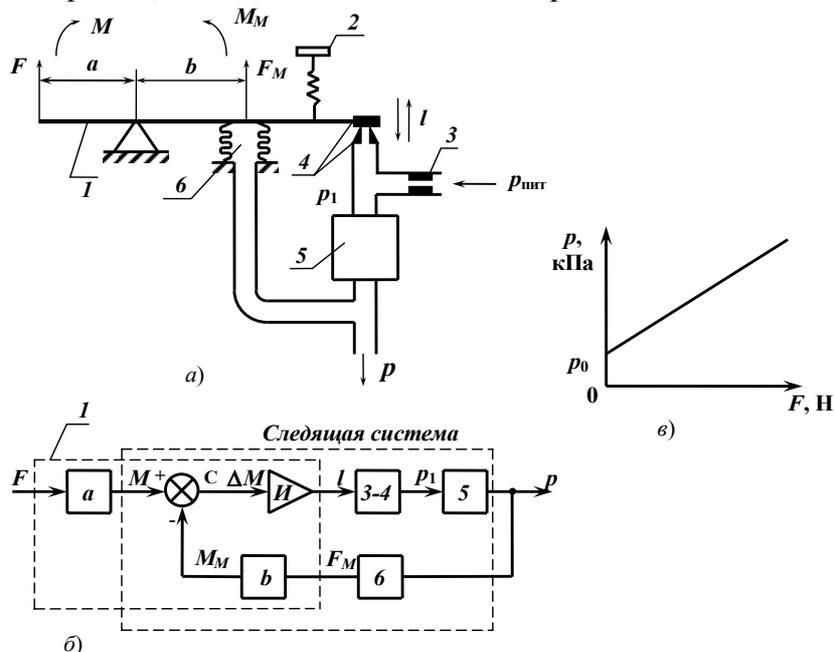
Рассмотрим принцип действия преобразователя. К рычагу приложены измеряемая сила  $F$  и сила  $F$ , создаваемая сильфоном  $b$ . Эти силы создают на рычаге противоположно направленные моменты:

$$M = aF; \quad (4.1)$$

$$M_M = bF_M, \quad (4.2)$$

где  $a$  и  $b$  – длины плеч рычага.

Результирующий вращающий момент  $\Delta M = M - M_M$  вызывает поворот рычага  $l$  и перемещение  $l$  расположенной на нем заслонки элементарного преобразователя сопло-заслонка 3–4. Выходной сигнал этого преобразователя – давление сжатого воздуха  $p_1$  – после усиления по мощности в усилителе 5 становится выходным сигналом  $p$  всего преобразователя. Этот выходной сигнал подается на вход обратного преобразователя – сильфона  $б$ , замыкая тем самым цепь обратной связи.



**Рис. 4.1. Преобразователь силы в давление сжатого воздуха:**

$a$  – устройство;  $б$  – структурная схема;  $в$  – статическая характеристика;

$l$  – рычаг; 2 – корректор нуля; 3 – постоянный дроссель; 4 – сопло с заслонкой; 5 – усилитель мощности;  $б$  – сильфон;

$a, b$  – плечи рычага;  $\Sigma$  – сумматор;  $I$  – интегратор

Наличие в следящей системе интегратора  $I$  в виде рычага делает ее астатической. Следовательно, в установившемся состоянии такой системы рассогласование равно нулю, так как в рассматриваемом преобразователе рассогласованием является разность моментов  $M$  и  $M_M$ , которые в состоянии равновесия оказываются равными. Это означает, что связь выходного сигнала следящей системы  $p$  с ее входным сигналом  $M$  такая же, как с сигналом  $M_M$ . Но, как видно из структурной схемы, момент  $M_M$  результат преобразования выходного давления  $p$  двумя преобразователями в цепи обратной связи: сильфоном  $б$  и плечом рычага  $b$ .

Таким образом, статическая характеристика всей следящей системы, как преобразователя момента  $M$  в давление  $P$ , определяется только статической характеристикой цепи обратной связи.

Найдем статическую характеристику цепи обратной связи. Для сильфона имеем

$$F_M = Sp. \quad (4.3)$$

Подставляя это выражение в формулу для рычага (4.2), получим статическую характеристику всей цепи обратной связи:

$$M_M = bSp. \quad (4.4)$$

Искомая статическая характеристика следящей системы получается из уравнения (4.4), если заменить в нем  $M_M$  на  $M$  и затем решить относительно  $P$ :

$$P = M / BS. \quad (4.5)$$

Теперь можно получить статическую характеристику всего преобразователя. Для этого достаточно заменить момент  $M$  силой  $F$  по формуле (4.1):

$$p = kF,$$

где коэффициент пропорциональности  $k = a / bS$  – коэффициент передачи преобразователя.

Тот факт, что статическая характеристика астатической следящей системы определяется только характеристикой обратной связи, является важным свойством следящих систем как измерительных устройств. Благодаря этому свойству метрологические требования ко всей системе могут быть выполнены в результате выбора преобразователя в цепи обратной связи с необходимой характеристикой. При этом в прямой цепи следящей системы могут быть применены преобразователи с низкими метрологическими качествами.

Так, в нашем случае перемещение рычага  $l$  преобразуется в выходное давление  $p$  преобразователем сопло-заслонка и усилителем мощности. Такое преобразование является нелинейным и, кроме того, зависит от давления питания  $p_{\text{пит}}$ .

В преобразователе имеется корректор нуля  $2$  (пружина). Изменяя натяжение пружины, можно создавать дополнительный вращающий момент на рычаге и тем самым изменять величину входного сигнала преобразователя при неизменном значении входного. При наладке преобразователя корректором устанавливают начальное значение выходного давления ( $p_0 = 0,2 \cdot 10^5$  Па) при нулевом значении измеряемой силы  $F$ .

С учетом влияния корректора статическая характеристика преобразователя силы в давление сжатого воздуха примет вид

$$p = p_0 + kF. \quad (4.6)$$

График этой характеристики приведен на рис. 4.1, в.

Следует подчеркнуть, что в данном преобразователе с помощью астатической следящей системы реализуется нулевой метод измерения. При этом роль переменной меры играют преобразователи в цепи обратной связи. Такой же прием используется во всех промежуточных преобразователях, которые будут описаны ниже.

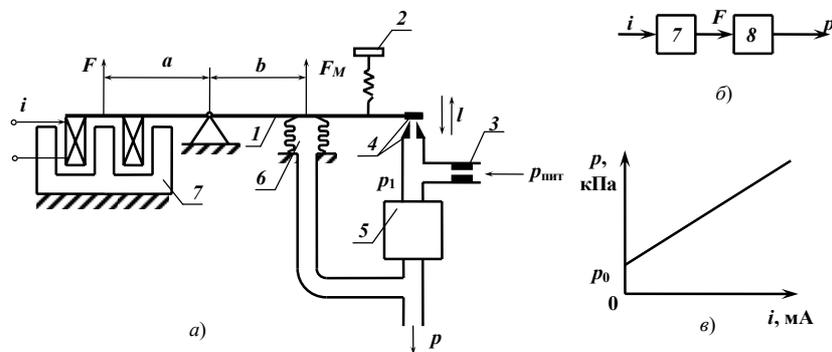
Рассмотренный преобразователь может служить и для преобразования перемещения и давление сжатого воздуха. В этом случае перед ним включают дополнительный преобразователь перемещения в силу (например, пружину).

Для преобразования силы в деление сжатого воздуха промышленность выпускает преобразователи, обычно объединенные в один блок с первичными преобразователями, имеющими выходной сигнал в виде силы. Поэтому для них регламентируются лишь предельное расстояние передачи выходного сигнала по пневмотрассе (300 м) и постоянная времени (равная 7 с) при работе преобразователя на тупиковую импульсную трубку длиной 60 м и внутренним диаметром 6 мм. Эта постоянная времени обусловлена нагрузочным эффектом и зависит от мощности выходного, сигнала, для повышения которого и применен пневматический усилитель мощности.

Предельное значение силы  $F$ , измеряемой преобразователем, для различных моделей – от 10 до 100 Н.

## 4.2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТОКА В ДАВЛЕНИЕ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Входным сигналом преобразователя (рис. 4.2) является ток  $i$  в катушке магнитоэлектрического преобразователя, а выходным – давление сжатого воздуха  $p$  на выходе усилителя мощности.



**Рис. 4.2. Преобразователь тока в давление сжатого воздуха:**

*a* – устройство; *б* – структурная схема; *в* – статическая характеристика;

*1* – рычаг; *2* – корректор нуля; *3* – постоянный дроссель; *4* – сопло с заслонкой; *5* – пневматический усилитель мощности; *6* – сильфон; *7* – магнитоэлектрический преобразователь; *8* – преобразователь силы в давление сжатого воздуха

Сравнив этот преобразователь с рассмотренным выше, можно, заметить, что он представляет собой последовательное соединение двух преобразователей (рис. 4.2, *б*). Первый – магнитоэлектрический преобразователь *7* входного тока  $i$  в силу  $P$ . Второй – преобразователь *8* этой силы в выходное давление сжатого воздуха  $P$ . Так как статические характеристики обоих преобразователей линейны, то и статическая характеристика всего преобразователя тока в давление сжатого воздуха также линейна.

Статическая характеристика преобразователя приведена рис. 4.2, *в*.

Установка начального значения выходного давления  $P_0 = 0,2 \cdot 10^5$  Па при нулевом входном токе производится корректором нуля *2*.

Для преобразования тока в давление сжатого воздуха промышленность выпускает преобразователи типа ЭПП-63. Метрические характеристики этого преобразователя по выходному сигналу аналогичны характеристикам преобразователя силы в давление сжатого воздуха. Кроме них для него регламентируется выходное сопротивление предыдущего измерительного преобразователя (приблизительно 1500 Ом), так как от этого сопротивления зависит дополнительная погрешность из-за нагрузочного эффекта.

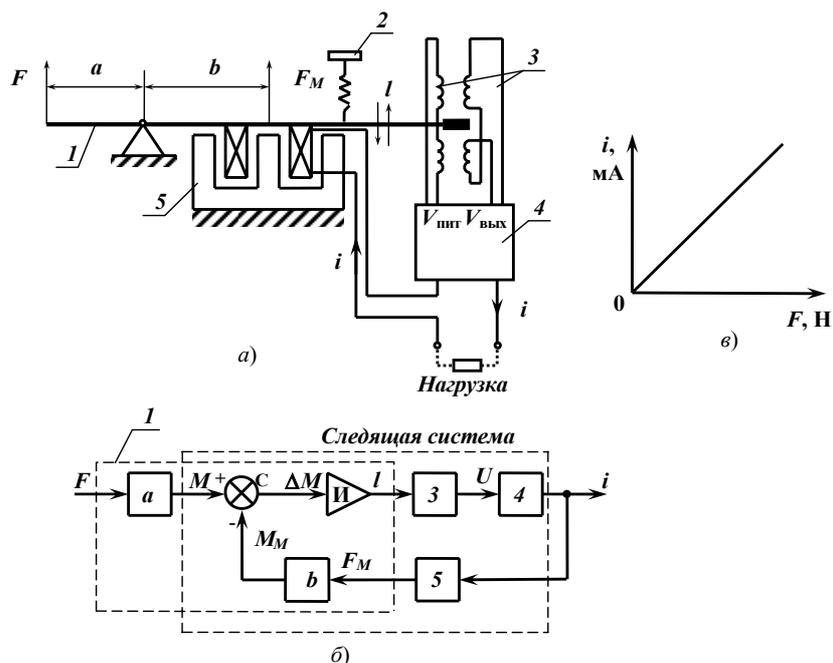
### 4.3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИЛЫ В ТОК

Входным сигналом преобразователя (рис. 4.3) является сила  $F$ , приложенная к левому плечу рычага  $a$ , а выходным – ток  $i$  на выходе усилителя.

Структурная схема преобразователя приведена на рис. 4.3, *б*. Из схемы видно, что его можно представить в виде двух последовательно соединенных преобразователей: преобразователя измеряемой силы  $F$  в момент  $M$  (приложенный к рычагу  $l$ ) и преобразователя этого момента в выходной сигнал  $i$ . Второй преобразователь представляет собой следящую систему, в цепь обратной связи которой включен магнитоэлектрический преобразователь *5* вместе с правым плечом рычага  $b$ . Рычаг выполняет те же функции, что и в преобразователях двух рассмотренных выше типов.

Принципы действия этих преобразователей во многом схожи. Здесь на рычаг  $l$  также действуют две силы: измеряемая сила  $F$  и сила  $F_M$ , создаваемая магнитоэлектрическим преобразователем *5*. Моменты этих сил  $M$  и  $M_M$  сравниваются на рычаге, и результирующий вращающий момент  $\Delta M$  вызывает поворот рычага и перемещение  $l$  прикрепленного к нему плунжера дифференциально-трансформаторного преобразователя *3*. Этот преобразователь преобразует перемещение  $l$  в напряжение переменного тока  $U$ , которое затем усиливается и выпрямляется в электронном усилителе *4*. Выходной сигнал усилителя – постоянный ток  $i$  – проходит через внешнюю нагрузку (например, миллиамперметр) и катушку магнитоэлектрического преобразователя, которые включены последовательно. Иначе говоря, выходной сигнал преобразователя – ток  $I$  – подается на вход магнитоэлектрического преобразователя, замыкая тем самым контур обратной связи следящей системы. Наличие интегратора И (рычага) делает эту систему астатической аналогично следящей системе на рис. 4.3, *б*. Поэтому статическая характеристика системы также определяется статической характеристикой цепи обратной связи. Магнитоэлектрический преобразователь в этой цепи имеет линейную характеристику и поэтому статическая характеристика всей следящей системы – зависимость тока  $i$  от момента  $M$  – также линейна. А так как характеристика преобразователя силы  $F$  в

момент  $M$  линейная, то и статическая характеристика всего преобразователя оказывается также линейной. Эта характеристика приведена на рис. 4.3, в.



**Рис. 4.3. Преобразователь силы в ток:**

$a$  – устройство;  $b$  – структурная схема;  $в$  – статическая характеристика;  $1$  – рычаг;  $2$  – корректор нуля;  $3$  – дифференциально-трансформаторный преобразователь;  $4$  – электронный усилитель с выпрямителем переменного тока;  $5$  – магнитоэлектрический преобразователь

Промышленность выпускает преобразователь силы в ток, который состоит из двух отдельных блоков. Один блок включает в себя элементы, имеющие механическую связь между собой: рычаг дифференциально-трансформаторный преобразователь и магнитоэлектрический преобразователь. Вторым блоком преобразователя является электронный усилитель. Расстояние между блоками должно быть не более 3 м при монтаже линии связи неэкранированным кабелем и не более 100 м при монтаже экранированным кабелем. Сопротивление нагрузки – не более 2500 Ом.

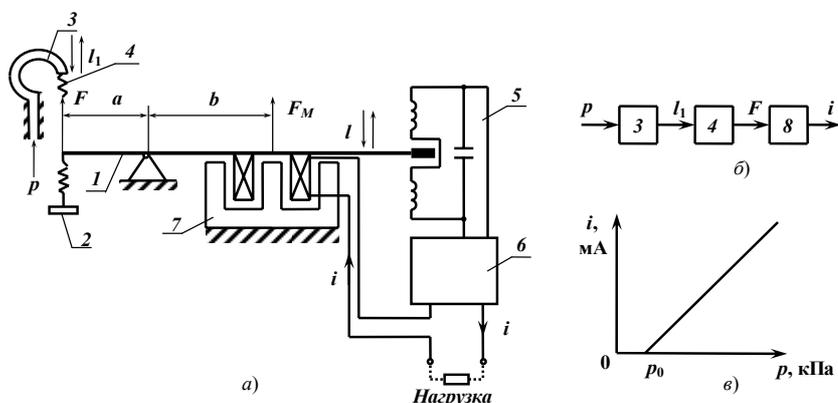
Измерительные приборы или другие потребители, например регулятор, могут быть подключены к преобразователю по двум схемам: измерения тока или измерения напряжения. В первом случае несколько потребителей соединяются последовательно друг с другом, во втором – параллельно специальному нагрузочному резистору.

В преобразователе имеется корректор нуля  $2$  – пружина, натяжением которой устанавливают нулевое значение выходного тока при нулевом значении измеряемой силы.

Максимальная сила, измеряемая преобразователем, в зависимости от модели 10...100 Н.

#### 4.4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА В ТОК

Входным сигналом преобразователя является давление сжатого воздуха  $P$ , подаваемое в трубчатую пружину, а выходным – ток  $i$ . Структурная схема преобразователя приведена на рис. 4.4, б.



**Рис. 4.4. Преобразователь давления сжатого воздуха в ток:**

$a$  – устройство;  $b$  – структурная схема;  $c$  – статическая характеристика;

$1$  – рычаг;  $2$  – корректор нуля;  $3$  – трубчатая пружина;  $4$  – пружина;

$5$  – колебательный контур;  $6$  – специальный усилитель;

$7$  – магнитоэлектрический преобразователь;  $8$  – преобразователь силы в ток

Как видно из схемы, преобразователь представляет собой последовательное соединение трех преобразователей. Первый – преобразователь 3 давления сжатого воздуха  $P$  в перемещение  $l_1$  конца трубчатой пружины, второй преобразователь 4 этого перемещения в силу  $F$ , приложенную к левому плечу рычага  $a$ . Статические характеристики обоих этих преобразователей линейны. Третий преобразователь 8 силы  $F$  в выходной ток  $i$  почти аналогичен предыдущему. Отличается он лишь тем, что перемещение  $l$  преобразуется не в напряжение переменного тока  $U$ , а в резонансную частоту колебательного контура 5 и затем усилителем 6 – в выходной ток  $i$ .

Статическая характеристика преобразователя 8 определяется характеристикой магнитоэлектрического преобразователя 7 и поэтому линейна. Следовательно, рассмотренный преобразователь, измерительная цепь которого состоит из трех преобразователей, имеет линейную статическую характеристику (рис. 4.4,  $c$ ).

Для преобразования давления сжатого воздуха в ток промышленность выпускает преобразователь типа ПЭ-55М. К нему может быть подключено несколько потребителей. Схемы и условия их подключения такие же, как для преобразователя силы в ток.

В преобразователе имеется корректор нуля 2, изменяющий натяжение пружины 4. Этим корректором устанавливают нулевое значение выходного тока при начальном значении измеряемого давления  $P_0$ .

#### 4.5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ВТОРИЧНЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Измерительные приборы предназначены для преобразования измеряемых сигналов в перемещение стрелки или пера относительно шкалы. Классифицируют измерительные приборы по различным признакам.

По виду выходного сигнала различают измерительные приборы показывающие, самопишущие и интегрирующие.

У показывающих приборов величина измеряемого параметра указывается отсчетным устройством (например, в виде шкалы со стрелкой). Эти приборы, просты по конструкции, однако показывают величину измеряемого параметра только в момент изменения, что не позволяет следить за его изменениями во времени. В большинстве приборов показывающее устройство выполнено в виде неподвижной шкалы и подвижной стрелки. В некоторых приборах, наоборот, шкала двигается относительно неподвижного указателя. Такая конструкция позволяет существенно уменьшить фронтальные размеры прибора. Результаты измерений могут быть выведены и на цифровое показывающее устройство. В этом случае на результат отсчета не влияют субъективные особенности оператора.

Самопишущие приборы снабжают устройством для автоматической записи результатов измерений, запись производится обычно на бумажной дисковой или ленточной диаграмме, движущейся с постоянной скоростью. Это позволяет наблюдать характер изменения параметров во времени. На дисковой диаграмме обычно записывают только один параметр. Ленточная диаграмма допускает поочередную за-

пись нескольких параметров. Такие приборы называются многоточечными и выпускаются на 3, 6 и 12 точек измерения.

В интегрирующих приборах предусмотрено непрерывное суммирование (интегрирование) мгновенных значений измеряемого параметра. Для этого они снабжены счетчиком (например, электрическим).

Измерительные приборы часто бывают комбинированными. Например, они могут одновременно показать и записать величину изменяемого параметра. Кроме того, измерительные приборы снабжаются дополнительными устройствами для сигнализации, регулирования и др.

Каждый тип прибора выпускается в различных модификациях, отличающихся размерами, диапазонами измерения, количеством входных сигналов, наличием вспомогательных устройств и т.д. Например, прибор ПВ10.1Э предназначен для работы с одним из регуляторов систем "Старт". Он показывает и записывает величину регулируемого параметра, показывает величину задания и управляющего воздействия; в прибор входит станция управления регулятором.

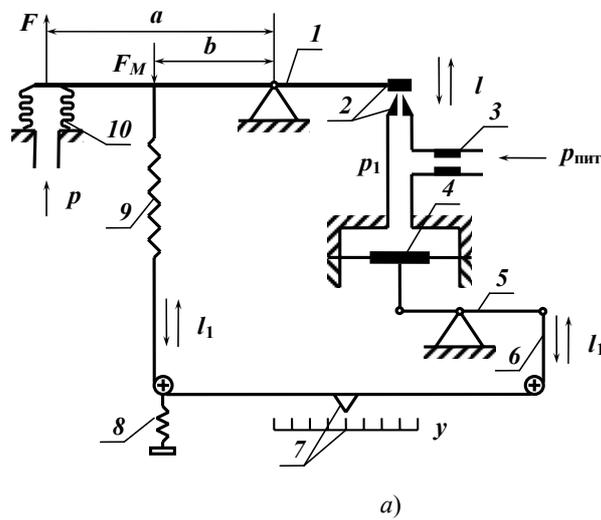
Для повышения точности измерений в измерительных приборах используется нулевой метод измерения с автоматическим уравниванием. Такие измерительные приборы действуют как автоматические компенсаторы.

*Приборы измерения давления сжатого воздуха* являются вторичными приборами пневматической системы "Старт" и применяются как универсальные для измерения любых технологических параметров, предварительно преобразованных в давление сжатого воздуха.

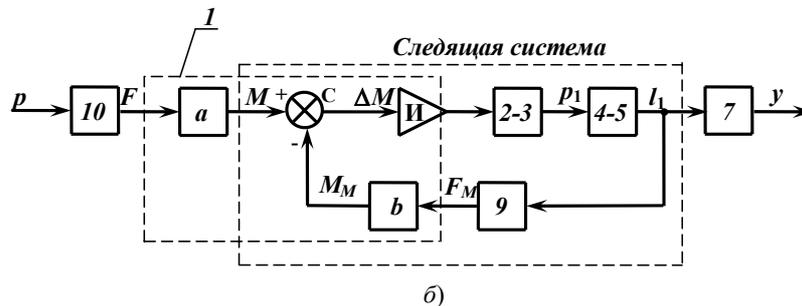
Принципиальная схема прибора приведена на рис. 4.5, а. Прибор состоит из сильфона 10, рычага 1, сопла с заслонкой 2, мембраны 4, связанной с рычагом 5, и пружины 9, связанной с другим концом рычага 5 леской 6. На леске укреплен стрелка показывающего устройства 7.

Структурная схема прибора дана на рис. 4.5, б. Измерительная цепь состоит из четырех преобразователей. Первый – сильфон 10 – преобразует измеряемое давление  $p$  в силу  $F$ , приложенную к рычагу 1. Второй преобразует эту силу в момент  $M$ . Функцию этого преобразователя выполняет большее плечо рычага  $a$ . Третий преобразует этот момент в перемещение стрелки 1 и представляет собой следящую систему. Цепь обратной связи этой системы образована пружиной 9 и меньшим плечом рычага  $b$ . Наконец, четвертый преобразователь – показывающее устройство 7 – преобразует перемещение стрелки относительно шкалы в показания прибора  $y$ .

Рассмотрим принцип действия прибора. К плечам рычага 1 приложены две силы: сила  $F$ , развиваемая сильфоном, и сила  $F_M$ , создаваемая пружиной. Эти силы создают на рычаге противоположно направленные моменты  $M$  и  $M_M$ . Результирующий момент  $\Delta M$ , равный их разности, преобразуется в перемещение 1 заслонки относительно сопла. Выходное давление  $P_1$  преобразователя сопло-заслонка 2–3 действует



а)



б)

**Рис 4.5. Прибор для измерения давления сжатого воздуха**

на мембрану 4. Прогиб мембраны вызывает поворот рычага 5. При этом правый конец рычага тянет леску 6, вызывая тем самым перемещение  $l$  нижнего конца пружины. Это перемещение является выходным сигналом следящей системы и одновременно входным сигналом цепи обратной связи. Растяжение пружины вызывает силу  $F_M$ , которая через меньшее плечо рычага  $b$  создает на нем момент  $M_M$ , замыкая тем самым контур обратной связи следящей системы.

В прямой цепи этой системы находится интегратор, роль которого выполняет рычаг  $l$ , и поэтому она является астатической. Статическая характеристика астатической системы, как известно, определяется характеристикой преобразователей в цепи обратной связи – пружины 9 с плечом  $b$  рычага. Следовательно, она линейная. Остальные преобразователи измерительной цепи на рис. 4.5, б имеют также линейные характеристики, поэтому шкала прибора получается одномерной.

Техническое обслуживание прибора заключается в периодической проверке нуля, смене диаграммы и заправке пишущего устройства чернилами. Для настройки нуля (при  $P_0 = 0,2 \cdot 10^5$  Па стрелка прибора должна остановиться на нулевой отметке шкалы) служит винт 8, с помощью которого измеряется начальное натяжение пружины 9.

Промышленность выпускает приборы типа ПВ для одновременного измерения одного, двух и трех пневматических сигналов. Конструкции этих приборов отличаются лишь количеством измерительных устройств, размещенных в одном корпусе.

### Вопросы для самостоятельной работы студентов

1. Сравните пневматический аналог Ома и закон Ома для электрической цепи. Найдите в них подобные составляющие.
2. Как определить пневматическое сопротивление элемента, зная перепад давления и расход воздуха через него? Можно ли это сделать, если воздух неподвижен?
3. В чем разница между ламинарным и турбулентным режимами движения, а также между ламинарными и турбулентными дросселями?
4. В чем разница между постоянными и переменными дросселями?
5. Почему последовательное соединение двух пневматических дросселей называется дроссельным сумматором?

6. Во сколько раз увеличится сила  $F$ , развиваемая мембраной, если ее диаметр увеличится в два раза?
7. Куда будет перемещаться свободный конец трубчатой пружины под действием давления или вакуума?
8. Зависит ли перемещение сильфона от давления воздуха снаружи?
9. Чему будет равен выходной сигнал преобразователя сопло-заслонка, если заслонка полностью закроет выходное отверстие?
10. Какой недостаток пневмоавтоматики устраняют усилители мощности?
11. Как изменится максимальное значение входного сигнала преобразователей силы и тока в давление сжатого воздуха и силы и давления в ток при изменении длины плеча  $a$  рычага?
12. Как изменится максимальное значение входного сигнала преобразователей силы и тока в давление сжатого воздуха и силы и давления в ток при изменении длины плеча  $b$  рычага?
13. Как изменятся статические характеристики преобразователей силы и тока в давление сжатого воздуха при колебаниях давления питания?
14. Как изменятся статические характеристики преобразователей силы и давления в ток при колебаниях напряжения питания усилителей?
15. Каково назначение пневматических усилителей мощностей в преобразователях силы тока в давление?
16. Как изменятся статические характеристики преобразователей силы и тока в давление и силы и давления в ток при натяжении пружины корректора нуля? Что произойдет при отпуске пружины корректора нуля?
17. Какие из рассмотренных преобразователей представляют собой статические следящие системы, а какие – астатические?
18. Какой элемент выполняет функцию интегратора в астатических системах?
19. Почему в приборе для измерения давления сжатого воздуха не применен усилитель мощности?
20. Как повлияет на показания прибора для измерения давления сжатого воздуха нестабильность давления питания?
21. Что покажет прибор для измерения напряжения переменного тока, если поменять местами концы первичной обмотки дифференциально-трансформаторного преобразователя?
22. Что покажет прибор для измерения напряжения переменного тока, если поменять концы вторичной обмотки дифференциально-трансформаторного преобразователя?

## **5. УНИФИЦИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ (УСЭППА)**

---



---

### 5.1. ЭЛЕМЕНТЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Аналоговая группа элементов включает в себя решающие (операционные) усилители, пневматические емкости и пневматические сопротивления или дроссели, повторители и задатчики давления [7, 9].

Двух- и четырехходовые операционные усилители давления УСЭППА называют *элементами сравнения*. Схема операционного усилителя с двумя входами представлена на рис. 5.1, а. Этот усилитель имеет три мембраны. На рис. 5.1, б представлена схема усилителя, который имеет четыре входа и пять

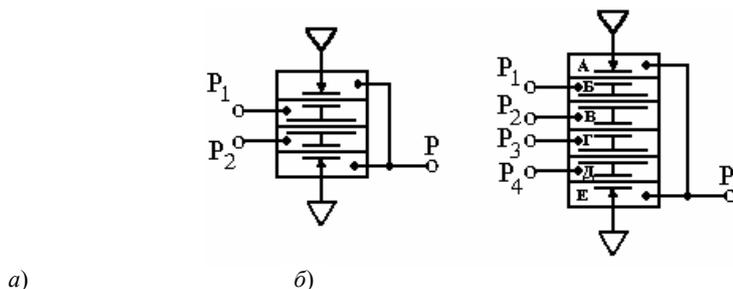
мембран. Трехмембранный элемент П2ЭС.1 сравнивает два давления  $P_1$  и  $P_2$  и в зависимости от знака их разности формирует на выходе сигнал "0" или "1". Уравнение элемента сравнения можно представить в виде

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{пит}} \text{Sg}(P_1 - P_2).$$

Функция  $\text{Sg}(P_1 - P_2)$  равна 1, когда  $P_1 - P_2 \geq 0$ , и равна 0, когда  $P_1 - P_2 < 0$ .

Четырехходовой операционный усилитель также может работать в режиме элемента сравнения. При этом значение выходного давления будет определяться уравнением

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{пит}} \text{Sg}[(P_1 + P_3) - (P_2 + P_4)].$$



**Рис. 5.1. Пневматические элементы сравнения (операционные усилители давления):**

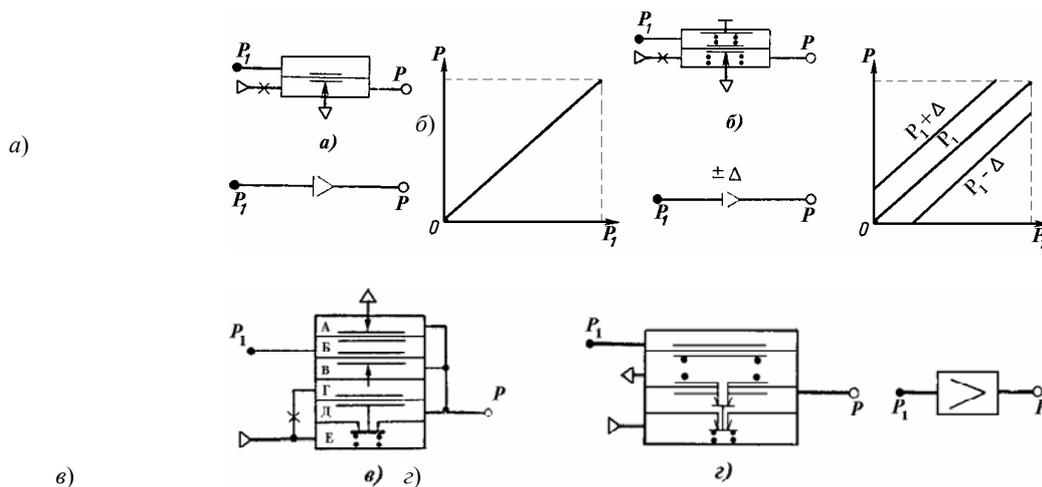
*a* – двухходовой П2ЭС.3; *б* – четырехходовой П2ЭС.1

Элементы сравнения используют для построения сумматоров двух, трех или четырех давлений. Для этого в камеру Д четырехходового усилителя (рис. 5.1, б) вводят сигнал отрицательной обратной связи из камеры Е. В этом случае равновесие мембранного сумматора сил возможно на линейном участке статической характеристики. На этом усилителе можно выполнять разные операции: при  $P_1 = P_B = P_\Gamma$  имеем

$P_{\text{вых}} = 2P_1 - P_2$ ; при  $P_3 = P_\Gamma = P$  получим  $P_{\text{вых}} = P_1 - P_2$ ; при  $P_2 = P_B = 0$  имеем  $P_{\text{вых}} = P_1 + P_3$ ; при  $P_B = P_\Delta = P$  получим  $P_{\text{вых}} = 0,5(P_1 + P_3)$ . В динамическом отношении сумматоры представляют собой усилительный элемент при частотах до 10...20 рад/с; основная погрешность сумматора на базе П2ЭС.3 не выше 0,5 %.

Операцию повторения входного сигнала часто реализуют специальными элементами – повторителями. Схемы повторителей представлены на рис. 5.2.

Промышленностью выпускаются четыре элемента УСЭППА: два маломощных повторителя П2П.1М (рис. 5.2, а), служащих для формирования маломощного выходного сигнала, равного входному, и П2П.2М (рис. 5.2, б), маломощный выходной сигнал которого отличается от входного на постоянную величину, а также два повторителя с мощным выходным сигналом (усилители мощности), один из которых П2П.7 (рис. 5.2, в) осуществляет точное повторение сигнала с усилением по мощности (класс точности 0,5), другой П2П.3 (рис. 5.2, г) является усилителем мощности низкой точности (без класса).



**Рис. 5.2. Схемы пневматических повторителей:**

*а* – маломощный точный повторитель; *б* – маломощный точный повторитель со сдвигом; *в* – повторитель-усилитель мощности высокой точности; *г* – повторитель-усилитель мощности низкой точности

Повторитель, схема которого дана на рис. 5.2, *а*, осуществляет повторение с погрешностью, не превышающей 0,5 %. Выходное давление повторителя является непрерывной величиной однозначно определяющей входное давление. Такое преобразование невозможно без использования сигнала отрицательной обратной связи.

При подаче на вход повторителя давления  $P_1$  мембрана перемещается вниз. Расстояние между соплом и мембраной, выполняющей функцию заслонки, изменяется. Давление  $P$  на выходе растет, что вызывает рост силы  $F$ , действующей на мембрану со стороны сопловой камеры и стремящейся отодвинуть мембрану от сопла. При увеличении расстояния между соплом и мембраной увеличивается расход газа через сопло в атмосферу, приводящий к уменьшению выходного давления. Таким образом, действие давления в камере в сопловой камере аналогично действию сигнала отрицательной обратной связи. Поэтому можно сказать, в повторителе существует цепь внутренней обратной связи, действие которой приводит к формированию на выходе повторителя аналогового сигнала.

У второго повторителя (рис. 5.2, *б*) к сигналу, повторенному с той же точностью, добавляется постоянная составляющая, настраиваемая путем поджатия пружин настроечным винтом. Для второго повторителя действительно равенство

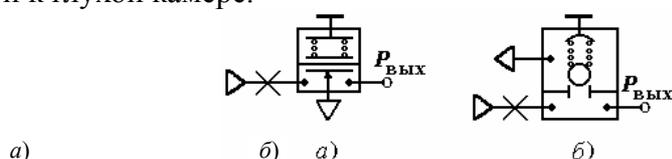
$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \pm \Delta,$$

где  $\Delta$  – дополнительное постоянное давление, зависящее от усилия, создаваемого пружинами. При этом знак плюс относится к случаю, когда равнодействующая сил двух пружин направлена вниз, а минус – когда сила направлена вверх.

Низкий уровень выходной мощности таких повторителей обусловлен тем, что выходное давление  $P_{\text{вых}}$  забирается из междроссельной камеры пневматического усилителя сопло-заслонка, имеющего постоянный дроссель с большим сопротивлением. Эти повторители предназначены для работы на внутрисхемных коммуникациях и их выходные давления подаются в глухие мембранные камеры малых размеров.

Мощный повторитель давления П2П.7 конструктивно оформлен как единый элемент, но фактически состоит из усилителя давления (камеры А, Б, В на рис. 5.2, *в*), грубого усилителя мощности (камеры Г, Д, Е) и канала отрицательной обратной связи по давлению.

Грубый повторитель (рис. 5.2, *г*) состоит из двухмембранного сумматора 1 и двух последовательно включенных переменных ПС (клапанов) 2 и 3 с большими проходными сечениями. Расход воздуха на выходе такого усилителя до 400...450 л/ч. При отсутствии расхода на выходе повторитель не потребляет никакой мощности, так как в этом состоянии клапан 3 находится на своем седле и линия питания оказывается подключенной к глухой камере.



**Рис. 5.3. Схемы датчиков давления:**

*а* – маломощный мембранного типа; *б* – типа П23Д.3

Усилители мощности устанавливаются на выходе пневматических приборов и регуляторов.

Для формирования пневматических сигналов определенного уровня в пневматических приборах используют *датчики* давления. Такие элементы могут быть построены как на базе дроссельного делителя, один из вводов которого соединен с источником питания, а другой – с атмосферой, так и на основе точного маломощного повторителя со сдвигом (рис. 5.2, *б*) и проточной камеры с регулируемым ПС типа шарик – цилиндр. В УСЭППА входят датчик П23Д.3 (рис. 5.3, *б*) устанавливаемый перед глухими камерами, и мощный датчик П23Д.4 с дополнительным усилителем мощности.

Рассмотренные элементы характеризуются тем, что входные и выходные давления принимают в процессе работы любые значения в заданных пределах.

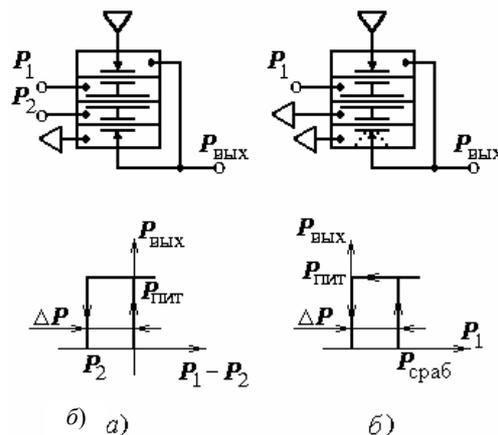
## 5.2. ЭЛЕМЕНТЫ ДИСКРЕТНОГО ДЕЙСТВИЯ

Сигналы, используемые в элементах дискретного действия, принимают лишь два значения: 0 и 1, причем нулю в системе УСЭППА соответствует давление равное атмосферному, а 1 – давление в пределах 0,08...0,14 МПа. Эти два уровня сигналов используют в качестве значений логических переменных.

Основным элементом устройств дискретного действия является *пневматическое реле* (рис. 5.4, а), схема которого аналогична схеме элемента сравнения. Однако их конструкции различны: пневматические реле имеют меньшие габаритные размеры, так как чувствительность его не должна быть такой высокой, как у элемента сравнения. В конструкции пневматического реле отсутствует регулировка сопл, тонкие мембраны заменены на более толстые, заслонка делается неметаллической, размер отверстия в соплах увеличен. Габаритные размеры пневматических реле меньше размеров элемента сравнения. Кроме того, упомянутые элементы отличаются друг от друга способом включения. Для введения положительной обратной связи в пневмореле нижнюю камеру соединяют с атмосферой, а верхнюю камеру с нижним соплом. Воздух расходуется лишь порциями, каждая порция поступает из питающей магистрали в момент, когда на выходе реле устанавливается высокий уровень давления, равный давлению питания, и выбрасывается в атмосферу при изменении выходного давления от значения равного давлению питания, до атмосферного. Таким образом, расход воздуха каждым реле существенно зависит от частоты срабатывания. Во время перехода мембранного блока из одного крайнего положения, при котором полностью закрыто одно из сопл, в другое крайнее положение, при котором оказывается закрытым противоположное сопло, мембранный блок обязательно проходит через все промежуточные положения и при этом оставляет открытыми оба сопла. В это время линия питания оказывается соединенной через два сопла с атмосферой и через нее расходуется воздух. По аналогии с электротехникой это явление можно назвать коротким замыканием, с которым связан дополнительный кратковременный расход воздуха.

Смещение мембранного блока пневмореле осуществляют путем подачи в одну из входных камер малого или большого давления подпора, равное 30...40 или 70...80 % от давления питания  $P_{пит}$ . На схемах камера малого подпора имеет одинарную штриховку, большого – двойную. В УСЭППА входят трехмембранные реле типа П1Р.1 (рис. 5.4, а) и П1Р.3 (рис. 5.4, б), в котором смещение мембранного блока осуществляется при помощи пружины, установленной в одной из сопловых камер.

Если давление  $P_2$  больше давления  $P_1$  (рис. 5.4, а), то верхнее сопло закрыто, а выход реле через нижнюю камеру сообщается с атмосферой и  $P_{вых} = 0$ . Так как давления в верхней и нижней камерах равны между собой, то при увеличении  $P_1$  шток реле перейдет в нижнее положение при  $P_1 = P_2$ . Давления на выходе реле  $P_{вых}$  и в верхней камере станут равными  $P_{пит}$ .



**Рис. 5.4. Схемы и статические характеристики пневматических реле**

В нижней камере за счет того, что она сообщается с атмосферой, избыточное давление всегда равно нулю. Следовательно, после перехода штока в нижнее положение на него будет действовать дополнительная постоянная сила, направленная вниз и равная произведению эффективной площади верхней мембраны на давление питания. Другими словами, будет иметь место положительная обратная связь. Если начать уменьшать давление  $P_1$ , то шток реле перейдет в верхнее положение при давлении  $P_1 = P_2 - P_{пит} \frac{S_1}{S_2 - S_1}$ , где  $S_1$  – эффективная площадь верхней (нижней) мембраны;  $S_2$  – эффективная площадь средней мембраны.

## 5.1. Реализация логических функций

с использованием пневматического реле П1Р.1

Функция и ее сим- воличе- ская за- пись	$P_1$	0	1	0	1	Схема	Условные обозначения
	$P_2$	0	0	1	1		
Отрица- ние (НЕ)	$P_{\text{ВЫХ}} = \bar{P}_1$	1	0	1	0		
Повторе- ние (ДА)	$P_{\text{ВЫХ}} = P_1$	0	1	0	1		
Конъ- юнкция (И)	$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 \wedge P_2$	0	0	0	1		
Дизъ- юнкция (ЕСЛИ- ТО)	$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 \vee P_2$	0	1	1	1		
Импли- кация (ЕСЛИ- ТО)	$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 \rightarrow P_2$	1	0	1	1		
Запрет (обрат- ная им-	$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 \leftarrow P_2$	0	1	0	0		

плика-								
ция)								

Петлеобразная  
отвечающая приведенным  
а, причем  $\Delta P = P_{\text{пит}} \frac{S_1}{S_2 - S_1}$ .

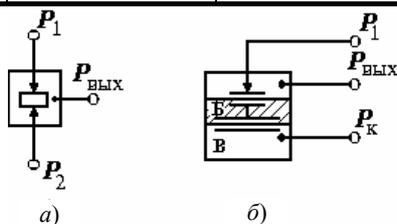
Реализация логических  
реле приведена в  
[7, 9].

Для коммутации  
простейших логических  
пневматические

контакт принято считать замкнутым, если у него заслонка удалена от сопла и пневматическая цепь не прервана. Пневматический контакт разомкнут, если заслонка полностью прикрывает сопло и пневматическая цепь прервана.

Пневматический клапан ПЗК.5 реализует функцию дизъюнкции двух переменных  $P_1$  и  $P_2$  (рис. 5.5, а). В одноконтантном клапане ПЗК.1 (рис. 5.5, б) применяют давление подпора, создаваемое в камере Б (или В) и командный сигнал  $P_k$ , вводимый в камеру В (или Б). При  $P_k = 1$  сигнал  $P_1$  не проходит на выход; если  $P_k = 0$ , то  $P_{\text{вых}} = P_1$ .

Рис. 5.5. Схемы пневматических клапанов:  
а – безмембранный типа ПЗК.5;  
б – одноконтантный клапан ПЗК.1



статическая характеристика реле,  
выше рассуждениям, показана на рис. 5.4,

функций с использованием пневматиче-  
табл. 5.1

пневматических сигналов и реализации  
операций также применяют

клапаны (рис. 5.5). Пневматический

### 5.3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Преобразователи, относящиеся к УСЭППА, предназначены для преобразования дискретных пневматических сигналов в электрическую форму (дискретный пневмоэлектрический преобразователь ПЭ), дискретных электрических сигналов в пневматическую форму (дискретный электропневматический преобразователь ЭП) и дискретных механических сигналов в пневматическую форму (конечный выключатель). В преобразователях ПЭ и ЭП электрической дискретной переменной является напряжение постоянного тока с уровнями 0 и 24 В.

Электропневматический преобразователь (рис. 5.6, а) состоит из двухконтантного клапана и электромагнита, якорь которого связан с заслонкой. Пневмоэлектрический преобразователь (рис. 5.6, б) выполняется в виде комбинации одномембранного клапана и микропереключателя, контакт которого жестко связан с мембраной. Механопневматический дискретный преобразователь (конечный выключатель) (рис. 5.6, в), представляет собой сочетание двухконтантного узла и механического толкателя.

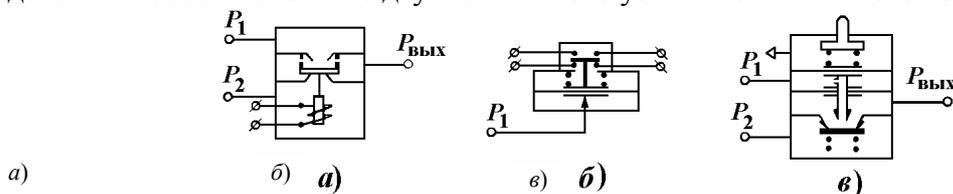


Рис. 5.6. Схемы преобразователей:  
а – электропневматический; б – пневмоэлектрический;  
в – механопневматический

### Вопросы для самостоятельной работы студентов

- За счет чего увеличивается мощность выходного сигнала в усилителях-повторителях мощности?
  - за счет увеличения давления в выходной линии;
  - за счет уменьшения утечек газа в атмосферу;
  - за счет увеличения расхода газа с сохранением входного давления.
- Чем обусловлен низкий уровень выходной мощности точных маломощных повторителей?
  - выходное давление забирается из междроссельной камеры усилителя "сопло-заслонка";

- б) осуществляется большой сброс воздуха в атмосферу;  
 в) входное сопротивление имеет малую величину.
3. Чем отличается задатчик давления мембранного типа от маломощного точного повторителя?
- а) коэффициент передачи  $K \gg 1$ ;  
 б) в нем осуществляется повторение задаваемого с помощью настроечного элемента усилие;  
 в) его коэффициент передачи  $K = 1$ .
4. Маломощные точные повторители предназначены для работы ...
- а) с внешними удаленными устройствами;  
 б) на внутрисхемных коммуникациях;  
 в) с устройствами, имеющими малое входное сопротивление.
5. При каком соотношении усилий пружин выходное давление маломощного точного повторителя со сдвигом будет иметь величину ...
- а)  $P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} + \Delta$  ;  
 б)  $P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} - \Delta$  ;  
 в)  $P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}}$  .

## 6. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ

подавляющее большинство технических средств автоматизации можно представить в виде совокупности узлов, выполняющих различные функции и объединенных в единое целое по заданному алгоритму. Без изучения схем и принципа действия пневматических узлов невозможно понимание особенностей работы сложных ТСА.

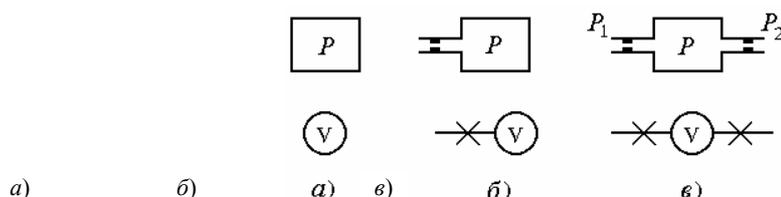
### 6.1. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ КАМЕРЫ

Соединение емкости объемом  $V$  и одного или нескольких ПС получило название *пневматической камеры* [3]. Схемы камер представлены на рис. 6.1.

Пневматическая камера представляет собой специально организованное инерционное звено, предназначенное для накопления сжатого воздуха и изменения его давления во времени по определенному закону. Процессы, происходящие в пневматических камерах в динамическом режиме работы, описываются соответствующими дифференциальными уравнениями. Знание динамики и статики пневматических камер необходимо при анализе и синтезе различных технических средств автоматизации.

Пневматические камеры применяются в схемах для реализации непрерывных и дискретных временных операций, таких, как интегрирование, дифференцирование, предварение, и в схемах, вырабатывающих синхронизирующие сигналы на выходе (генераторах), и в схемах, преобразующих входной сигнал (импульсаторах).

В пневмоавтоматике применяют камеры со сквозным потоком, называемые проточными или междроссельными (рис. 6.1, в), если в пневматических камерах происходит только приток воздуха через одно или несколько сопротивлений, то такие камеры называются глухими или непроточными (рис. 6.1, б). В изолированных камерах (рис. 6.1, а) отсутствует связь с окружающей средой.



**Рис. 6.1. Схемы и условные обозначения пневматических камер:**

а – изолированной; б – глухой; в – проточной

У глухих камер используются только их динамические свойства, тогда как у проточных камер – как статические, так и динамические. Пневматические проточные и глухие камеры получили широкое распространение в технических средствах автоматики. Проточная пневматическая камера может быть использована как делитель абсолютных и избыточных давлений. Если дроссели проточной камеры линейные, то камера может работать как простейший сумматор давлений. Наиболее широко пневматические

проточные камеры применяют в пневматических приборах и регуляторах в качестве основного звена усилителей сопло-заслонка, имеющих постоянный дроссель на входе в междроссельную емкость и переменный дроссель сопло-заслонка на выходе из емкости. Глухие камеры с дросселями, близкие по своим свойствам к апериодическим звеньям, а также камеры с упругим переменным объемом находят применение при построении пневматических дифференцирующих и интегрирующих устройств, генераторов импульсов, обегających устройств, импульсаторов, реле времени и т.д. Для реализации апериодических звеньев могут быть использованы также и проточные камеры.

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

На базе проточных камер малого объема с ламинарными ПС проводимостью  $\alpha_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) строят дроссельные сумматоры, предназначенные для суммирования давлений  $P_1, P_2, \dots, P_m$  с весами  $k_1, k_2, \dots, m$ . Давление в камере сумматора

$$P = \sum_j k_j P_j, \quad j = 1, m,$$

где  $k_j = \alpha_j / (\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m)$ .

## 6.2. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ РЕШАЮЩИЕ УСИЛИТЕЛИ ДАВЛЕНИЙ

Пневматические решающие усилители – это операционные усилители, охваченные отрицательной обратной связью. Они предназначены для выполнения математических операций: сложения, умножения на постоянный коэффициент, дифференцирования, интегрирования и т.д.

Рассмотрим схему устройства, построенного на трехмембранном элементе сравнения и дроссельном делителе (рис. 6.2), осуществляющего операцию умножения на постоянный коэффициент.

Условием равновесия мембранного блока трехмембранного элемента сравнения является выражение

$$+P_B - P_B = 0.$$

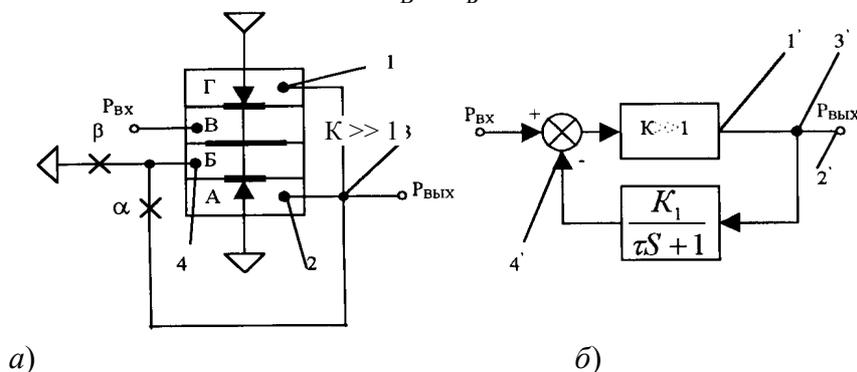


Рис. 6.2. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы устройства

На принципиальной схеме (а) линия 1 – 2 соответствует линии 1' – 2' на структурной схеме (б). Выходной сигнал  $P_{ВЫХ}$  по линии 3 – 4 подается во входную камеру Б. Этой линии на структурной схеме соответствует линия 3' – 4'. 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  $P_{ВХ}$  и на выходе сформирован сигнал  $P_{ВЫХ}$ . Мембранный блок элемента находится в равновесии. Подадим на вход единичный ступенчатый сигнал величиной  $P_0$ . 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 Б, является давлением отрицательной обрат-

ной 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:

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

$$K_1 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}; \quad P_{\text{ВХ}} = P_B. \quad (6.1)$$

Из (6.1) 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 сбрасывается в атмосферу.

Проведем анализ пневматического устройства (рис. 6.3), 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  $\alpha_2$  и  $\beta_2$ , 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.

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:

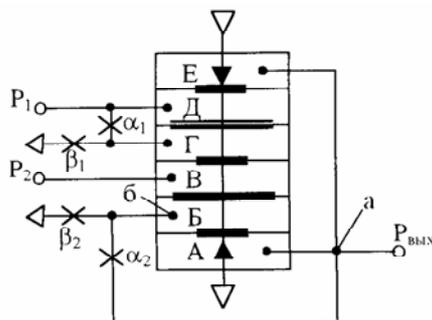
$$+P_D - P_\Gamma + P_B - P_B = 0. \quad (6.2)$$

В соответствии со схемой включения устройства (рис. 6.3)

$$P_D = P_1; \quad P_B = P_2. \quad (6.3)$$

На дросселях  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  и  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$  собраны дроссельные делители, поэтому

$$P_\Gamma = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1} P_1; \quad P_B = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2} P_{\text{ВЫХ}}. \quad (6.4)$$



**Рис. 6.3. Принципиальная схема устройства, состоящего из пятимембранного элемента сравнения и двух дроссельных делителей**

Подставив (6.3) и (6.4) в (6.2), получим

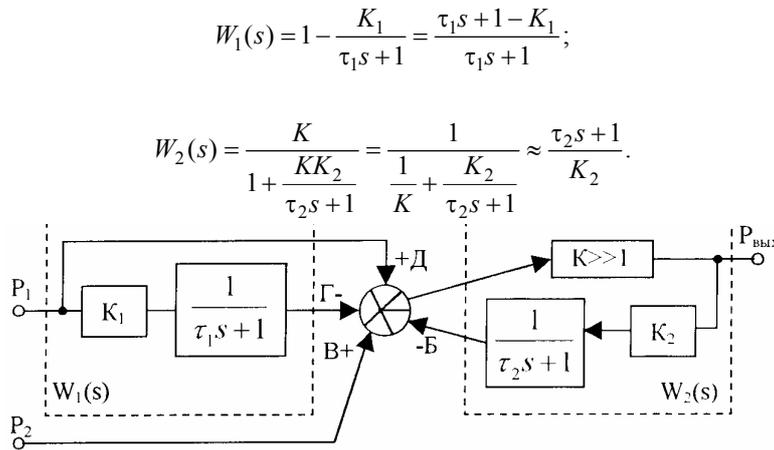
$$P_{\text{вых}} = \frac{1-K_1}{K_2} P_1 + \frac{1}{K_2} P_2, \quad (6.5)$$

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 (6.5) составим структурную схему устройства. Элемент сравнения представим в виде последовательно соединенных сумматора и усилительного звена с большим коэффициентом усиления. Дроссельные делители  $\alpha_1, \beta_1$  и  $\alpha_2, \beta_2$  и соответствующие камеры  $\Gamma$  и  $B$  элемента сравнения представим в виде последовательно соединенных усилительных и аperiodических звеньев.

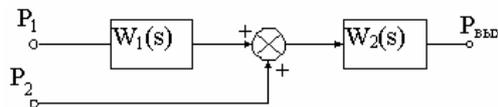
Найдем передаточную функцию  $W(s)$  устройства. Для этого в начале найдем передаточные функции  $W_1(s)$  и  $W_2(s)$  частей схемы, отмеченных на рис. 6.4.

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, стоящими в отрицательной обратной связи



**Рис. 6.4. Структурная схема устройства**

Тогда структурная схема устройства преобразуется к виду рис. 6.5.



**Рис. 6.5. 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. Поэтому 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  $P_1 = 0$

$$W_4(s) = W_2 = \frac{\tau_2 s + 1}{K_2}, \quad (6.6)$$

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

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

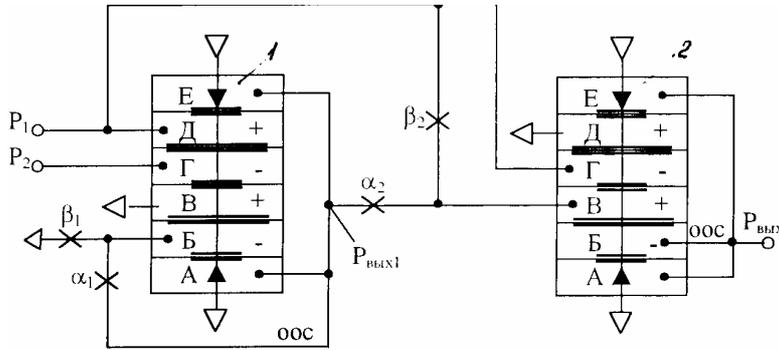
$$P_1(t) = P_1 1(t), \quad P_2(t) = P_2 1(t);$$

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

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

Тогда

$$P_{\text{ВЫХ}}(\infty) = \frac{1 - K_1}{K_2} P_1 + \frac{1}{K_2} P_2. \quad (6.7)$$



**Рис. 6.6. Принципиальная схема устройства, построенного на двух пятимембранных элементах сравнения**

Полученное из передаточных функций выражение (6.6) для выходного сигнала  $P_{\text{ВЫХ}}$  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 (6.5). Это совпадение подтверждает правильность анализа схемы устройства.

Проведем анализ устройства (рис. 6.6), построенного на двух пятимембранных элементах сравнения, дроссельных делителей  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  и сумматоре  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$ .

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

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

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

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

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

$$P_D = 0; \quad P_G = P_1; \quad P_B = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2} P_{\text{ВЫХ}1} + \frac{\beta_2}{\alpha_2 + \beta_2} P_1; \quad P_A = P_{\text{ВЫХ}}.$$

Тогда

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2} \left( \frac{\beta_1}{\alpha_1} P_1 - \frac{\alpha_1 + \beta_1}{\alpha_1} P_2 \right). \quad (6.8)$$

По принципиальной схеме устройства составим структурную схему (рис. 6.7). Найдем передаточные функции  $W_1(s)$  и  $W_2(s)$ , заметив, что в соединении исходных звеньев использована отрицательная обратная связь:

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

$$W_2(s) = \frac{K}{1 + K} \approx 1, \quad (6.9)$$

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

Структурная схема устройства (рис. 6.7) преобразуется к виду, представленному на рис. 6.8.

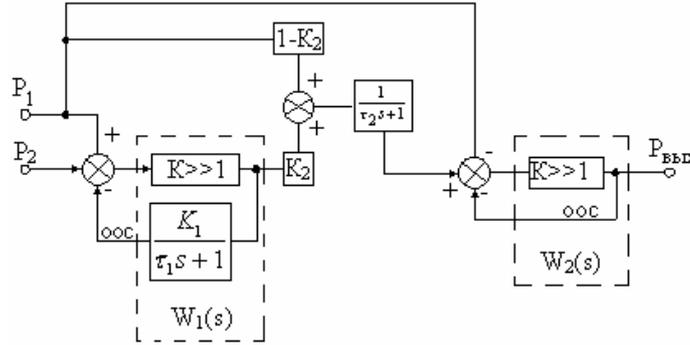


Рис. 6.7. Структурная схема устройства

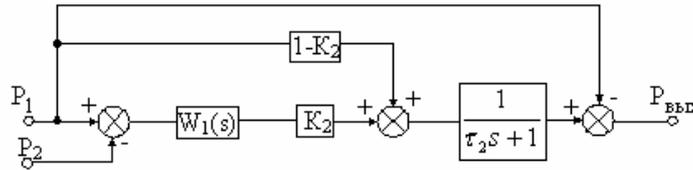


Рис. 6.8. Преобразованная структурная схема устройства

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  $P_2(t) = P_2 1(t)$ :

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

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{\text{вых}}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s P_{\text{вых}}(s) = P_1 \left( \frac{K_2}{K_1} - K_2 \right) - \frac{K_2}{K_1} P_2. \quad (6.10)$$

Совпадение результатов (6.7) и (6.10) подтверждает правильность проведенного анализа устройства в установившемся режиме работы.

### 6.3. Устройства запоминания и задержки

#### пневматических сигналов

При создании автоматических устройств контроля часто возникает необходимость в запоминании пневматических сигналов и задержки их в течение определенных отрезков времени. Первая задача решается с помощью устройств, способных запоминать непрерывный пневматический сигнал, а вторая – с помощью устройств задержки [7, 9].

*Устройство запоминания непрерывных пневматических сигналов.* В УСЭППА существует элемент памяти непрерывный П2ЭП.1, представляющий собой комбинацию двух элементов: пневматического клапана и повторителя (рис. 6.9, а). В качестве клапана используют трехмембранное реле, в одну из камер которого подается постоянное давление подпора, а в другую поступает давление управления  $P_t$ .

Рассмотрим работу устройства памяти, когда управление им осуществляется с помощью прямоугольных импульсов, поступающих от генератора. Если на вход устройства памяти поступает непрерывный пневматический сигнал  $P_1$ , то такое устройство при подаче на него давления управления  $P_t$  запомнит текущую величину пневматического

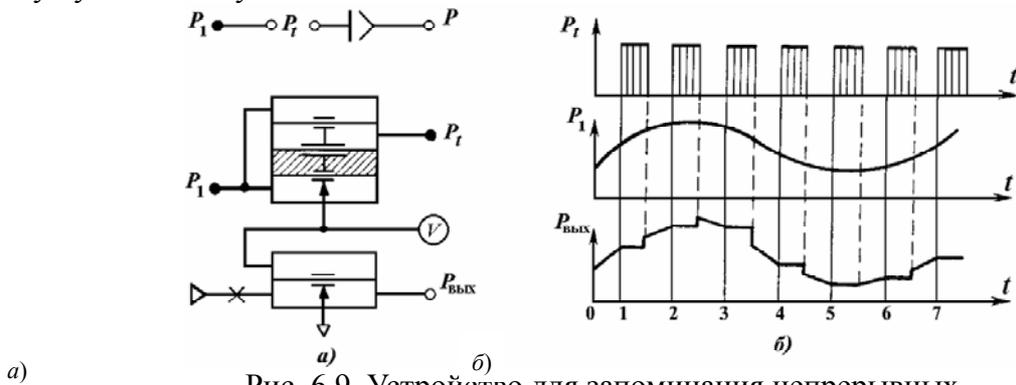


Рис. 6.9. Устройство для запоминания непрерывных

пневматических сигналов а) и временная диаграмма его работы б)

сигнала, так как пневматическая емкость  $V$  отключается от входной линии. Давление в пневматической емкости, а следовательно, и на выходе схемы сохраняется неизменным, пока подается давление  $P_t$ . Постоянная емкость  $V$  включается в устройство для повышения стабильности его работы и устранения влияния утечек из глухой камеры.

Диаграмма работы устройства памяти (рис. 6.9, а) при постоянной частоте следования импульсов  $P_t$  и при непрерывном изменении входного сигнала  $P_1$  показана на рис. 6.9, б).

*Непрерывно-дискретную задержку входного сигнала на такт*, построенную на основе устройства запоминания пневматических сигналов (оперативной памяти), широко применяют в различных непрерывно-дискретных устройствах.

Устройство задержки на такт состоит из двух последовательно включенных элементов памяти П2ЭП.1, сигнал управления  $P_{\text{упр}}$  в которых подается в различные камеры соответствующих пневматических реле (рис. 6.10).

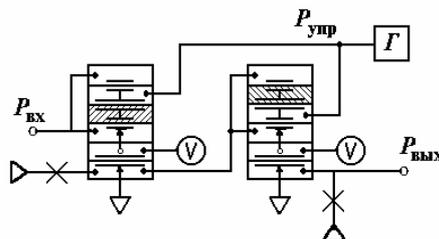


Рис. 6.10. Устройство задержки пневматического сигнала

Устройство задержки осуществляет ступенчатую аппроксимацию непрерывного входного сигнала  $P_{\text{вх}}$  в следующем порядке. Обычно сигналы управления  $P_{\text{упр}}$  подводятся к устройству от генератора прямоугольных импульсов, при этом длительность ступенек аппроксимации определяется частотой их по-

явления. При  $P_{упр} = 0$  подаваемый на вход первого элемента памяти сигнал  $P_{вх}$  проходит в камеру повторителя, в результате на выходе первого элемента памяти обрабатывается сигнал, равный  $P_{вх}$ . В это время во втором элементе памяти входная камера повторителя оказывается отсеченной от выхода первого элемента памяти, и в ней сохраняется давление, равное подаваемому от первого элемента в момент, когда  $P_{упр}$  в предыдущем такте стало равным 0. В рассматриваемом случае это давление равно нулю. Такое давление и обрабатывается повторителем второго элемента в данный момент времени.

В момент времени, когда  $P_{упр}$  становится равным условной единице (обычно, 0,14 МПа), в первом элементе запоминается текущее (в момент времени  $t_1$ ) значение давления  $P_{вх1}$ , это давление поступает во второй элемент памяти и обрабатывается повторителем на выходе устройства задержки на такт. Когда  $P_{упр}$  опять принимает значение, равное нулю, второй элемент памяти запоминает поступающее от первого элемента давление  $P_{вх1}$  и продолжает обрабатывать его. В первый же элемент памяти в этот момент времени поступает уже новое значение изменяющегося входного сигнала и на выходе его обрабатывается новый сигнал. В момент времени  $t_2$  при подаче импульса управления первый элемент запоминает новое мгновенное значение входного сигнала  $P_{вх2}$ . Этот сигнал поступает в повторитель второго элемента памяти и затем на выход устройства. В дальнейшем работа устройства осуществляется аналогично изложенному выше.

При непрерывном изменении входного сигнала давление на выходе устройства изменяется ступенчато, причем высота каждой ступени, отсчитанной от нулевого уровня, равна мгновенному значению входного сигнала. После запоминания мгновенного значения сигнала, величина сигнала на выходе устройства не изменяется в течение одного периода (такта) работы генератора. Поэтому такие устройства называют устройствами задержки на такт.

#### 6.4. ИМПУЛЬСАТОРЫ

*Импульсаторы* используют для деформации пневматических дискретных сигналов: смещения, затягивания, укорачивания по фронту и срезу и т.д. Рассмотрим простейшие импульсаторы, которые выполняются на одном пневматическом реле с включением на вход в какую-либо одну из его глухих камер инерционного звена, с помощью которого осуществляется естественная задержка сигнала во времени [7, 9].

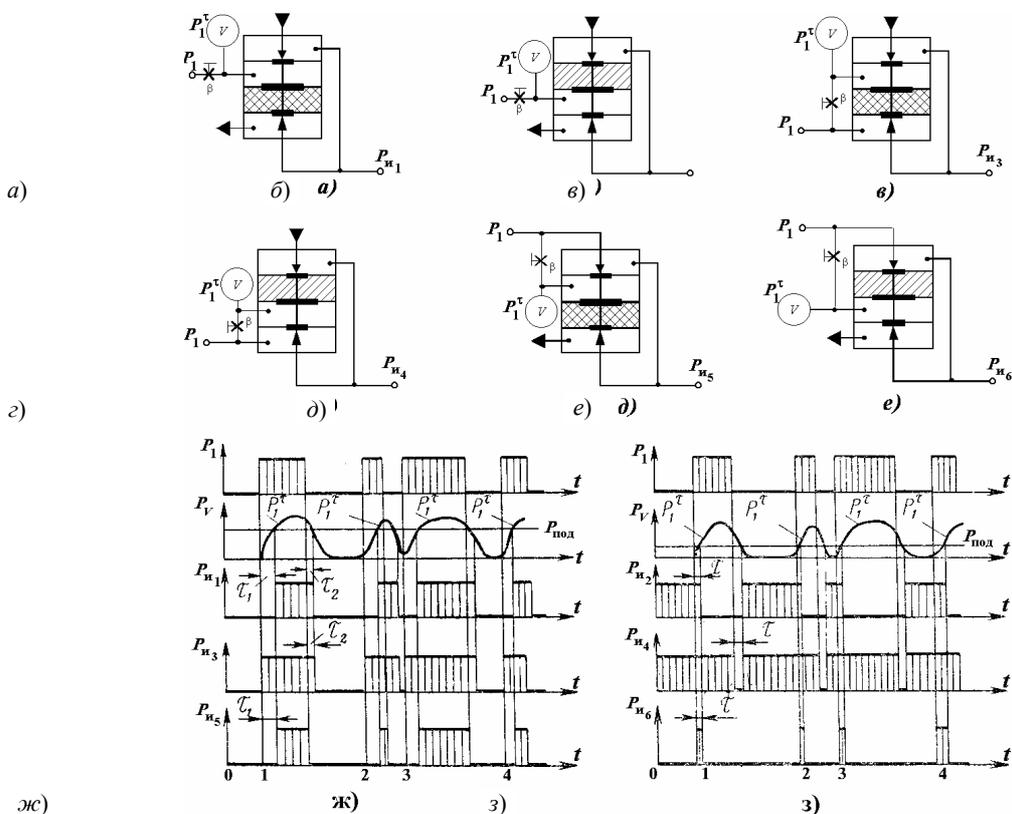


Рис. 6.11. Схемы простейших импульсаторов и временные диаграммы их работы

На рис. 6.11 приведено шесть схем импульсаторов, которые в зависимости от реализуемой пневматическим реле с подпором логической операции видоизменяют входной сигнал. Если пневматическое реле включено полуактивным способом (отсутствует питание), необходима развязка сигнала, идущего в глухую камеру и на сопло с помощью пневматического реле, включенного по схеме повторения (на схеме не показано). Строго говоря, смещение по фронту и срезу происходит на разное время  $\tau$ , так как нужно учитывать ширину петли гистерезиса пневматического реле. Графики, изображенные на рис. 6.11, ж и з (где  $\tau_1$  – время смещения сигнала по фронту, а  $\tau_2$  – по срезу) приведены без учета петли гистерезиса. Величина смещения выходного сигнала зависит не только от  $\tau$ , но и от значения подпора.

На рис. 6.11, а и б пневмореле включены по одновходовой схеме сигнала  $P_1^c$ , задержанного на время  $\tau$ .

На рис. 6.11, в – е пневмореле включены по двухвходовой схемам конъюнкции, запрета, дизъюнкции и импликации, в которых одним сигналом является  $P_1$ , а вторым тот же сигнал, но задержанный на время  $\tau$ .

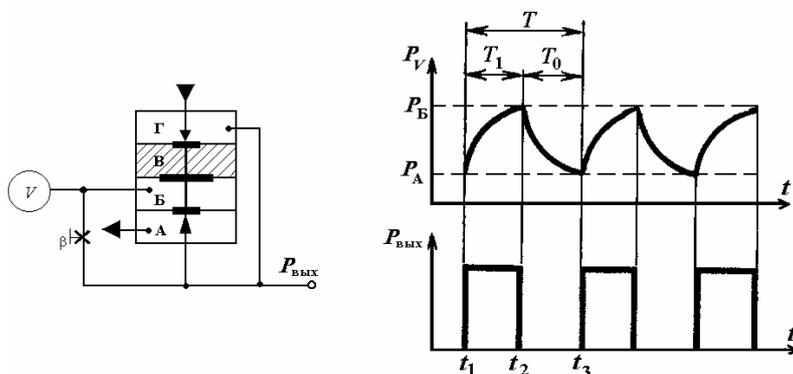
Сложные импульсаторы можно построить с использованием логических операций: штрих Шеффера, стрелка Пирса, равнозначность и неравнозначность.

## 6.5. ГЕНЕРАТОРЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

Пневматические генераторы импульсных сигналов строят также с использованием естественной задержки, т.е. с применением инерционного звена.

Простейший генератор выполняют на пневматическом реле (с коротким или без короткого замыкания), включенном по схеме отрицания и введенным в режим автоколебаний с помощью обратной связи, в цепь которого помещено инерционное звено [7, 9]. Схема и график работы такого генератора приведены на рис. 6.12. Длительность  $T$  тактов 1, 2, ...,  $n$  определяется величиной инерционности, управляемой при  $V = \text{const}$  проводимостью  $\beta$  пневматического сопротивления.

Величина подпора влияет на длительность такта и одновременно на соотношение нулевого  $T_0$  и единичного  $T_1$  сигналов внутри такта. Такой генератор применяют в качестве отметчика времени, в котором полутакты не используют.



**Рис. 6.12. Схема и график работы пневматического генератора прямоугольных импульсов**

На мембранных элементах УСЭППА могут быть собраны генераторы импульсов не только прямоугольной, но и другой формы, например, нарастающего, убывающего давлений и пилообразных колебаний.

Рассмотрим генератор непрерывно нарастающих давлений. Такой генератор может быть собран на базе интегрирующего вычислительного устройства. Однако чаще используют более простые и точные устройства.

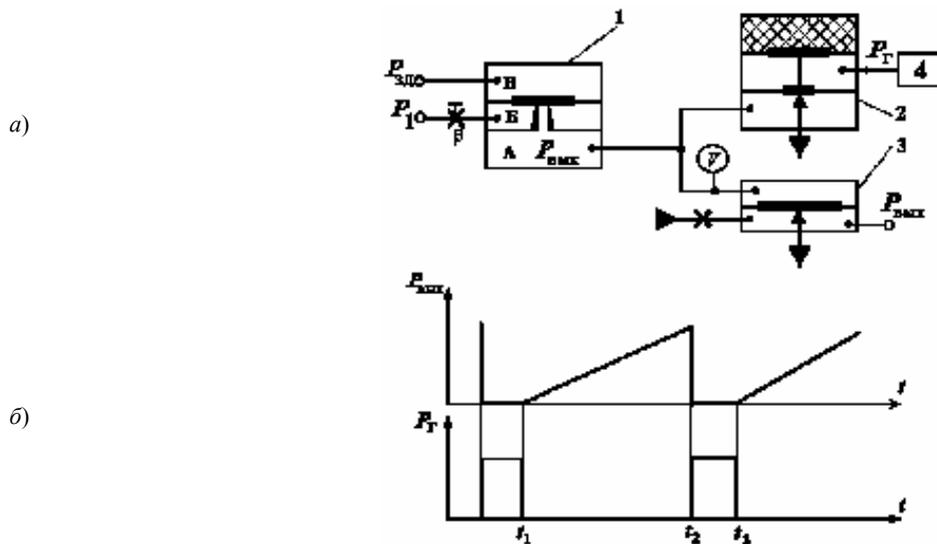
Генератор непрерывно и линейно нарастающих давлений (рис. 6.13, а) состоит из емкости  $V$ , сопротивления  $R$ , повторителя 3, управляемого пневматического клапана 2, генератора прямоугольных колебаний 4 и устройства 1, осуществляющего автоматически поддержание постоянного перепада давления на сопротивлении  $R$ .

Работа генератора линейно нарастающего давления происходит следующим образом.

В момент времени  $t_1$  (рис. 6.13, б), когда сигнал прямоугольных колебаний  $P_T$  от генератора становится равным нулю, клапан 2 изолирует емкость  $V$  от атмосферы и в ней начинает линейно нарастать давление до момента времени  $t_2$ . Давление в емкости повторяется с помощью повторителя 3.

При появлении импульса давления от генератора в момент времени  $t_2$  клапан 2 соединяет емкость  $V$  с атмосферой и давление в емкости, а следовательно, и на выходе схемы мгновенно становится равным нулю.

В момент времени  $t_3$  клапан 2 изолирует емкость  $V$  от атмосферы, и все описанные процессы повторяются.



**Рис. 6.13. Пневматический генератор непрерывно нарастающего давления:**

а – схема генератора; б – циклограмма его работы

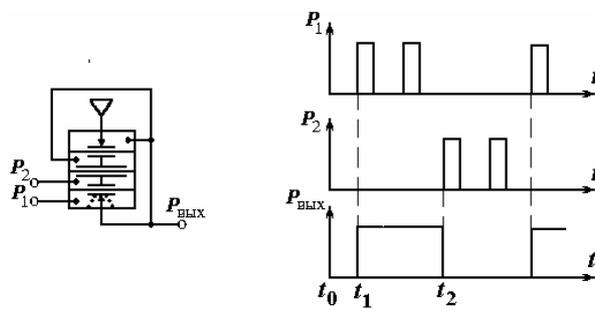
Принцип действия устройств, обеспечивающих линейное нарастание давления, заключается в следующем. Создается цепь из постоянного и управляемого сопротивлений и емкости. На постоянном сопротивлении поддерживается постоянный перепад давлений при постоянном давлении на входе. Через это сопротивление протекает газ с постоянным массовым расходом. В силу того, что управляемое сопротивление соединено последовательно с постоянным, через него протекает то же количество газа. Постоянство перепада давления достигается автоматическим регулированием с помощью мембранного устройства 1 проводимости управляемого сопротивления. Таким образом, в каждый момент времени в емкость поступает одно и то же количество газа и поэтому нарастание давления в ней происходит по линейному закону.

## 6.6. ТРИГГЕРЫ С РАЗДЕЛЬНЫМИ ВХОДАМИ

Триггер с раздельными входами находит широкое применение в системах автоматического контроля, реализующих импульсные и непрерывно-импульсные методы.

Триггером с раздельными входами называют устройство, имеющие два устойчивых состояния и способное переходить из одного устойчивого состояния в другое при подаче сигналов давления на его вход. Переключение триггера происходит только при поочередном появлении единичных сигналов на независимых входах  $P_1$  и  $P_2$ ; повторное появление единичного сигнала на том же входе не меняет состояния триггера.

Триггер с раздельными входами можно реализовать на соответствующем сочетании различных логических операций, рассмотренных выше, например, на сочетании двух операций "стрелка Пирса", операций "запрет" и ИЛИ, операций "стрелка Пирса" и "запрет" др. Такие триггеры не сохраняют своего состояния при потере давления питания и устанавливается в безразличное положение при подаче давления питания. Если использовать для построения триггера с раздельными входами пневматическое трехмембранное реле с пружиной, то можно устранить указанное явление. Схема такого триггера показана на рис. 6.14.



**Рис. 6.14. Мембранный триггер с отдельными входами**

При потере давления питания триггер возвращается пружиной в исходное положение. При сигнале  $P_{\text{вых}} = 0$  мембранный блок приподнят пружиной, контакт питания разомкнут. При подаче сигнала  $P_1 = 1$  он проходит через замкнутый нижний контакт на выход триггера и в камеру реле. В результате мембранный блок переключится в нижнее положение и замкнется контакт питания. Триггер переключается в исходное положение только при  $P_2 = 1$ .

### 6.7. Пневматические линейные пульсирующие

сопротивления

*Пульсирующий дроссель* оформляется конструктивно как самостоятельный элемент – линейное пневматическое сопротивление. При рабочих давлениях нормального и высокого диапазонов проявляется сжимаемость воздуха. При этом условии практически невозможно реализовать линейное пневматическое сопротивление, которое необходимо для построения вычислительных устройств на базе решающего усилителя, выполняющих любые математические операции. Как известно, именно отсутствие такого сопротивления ограничивало область применения системы УСЭППА.

Сравнительно недавно было предложено пульсирующее линейное сопротивление, расход воздуха через которое линейно зависит от перепада давлений.

Принципиальная схема пульсирующего сопротивления представлена на рис. 6.15, а. Сопротивление состоит из емкости  $V_1$  и двух пневматических контактов клапанов 1 и 2, осуществляющих поочередное подключение емкости  $V_1$  к входной линии с абсолютным давлением  $P_1$  и выходной линии с абсолютным давлением  $P_2$ .

Допустим, что контакт 1 замкнут, а контакт 2 разомкнут (это соответствует открытому клапану 1 и закрытому клапану 2). Тогда масса газа в емкости

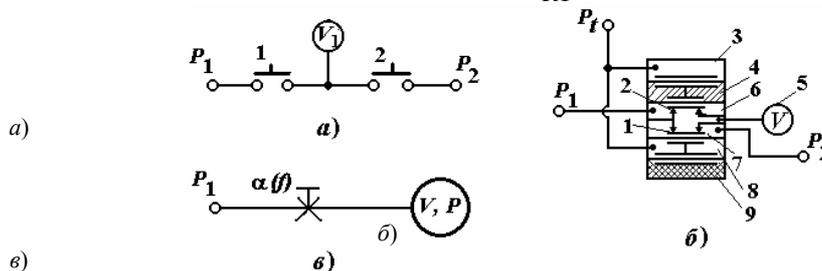
$$M_1 = \rho_1 V_1 = \frac{p_1 V_1}{RT}.$$

Когда контакт 1 разомкнут, а контакт 2 замкнут, количество газа в емкости

$$M_2 = \rho_2 V_1 = \frac{p_2 V_1}{RT}.$$

Таким образом, в результате одного замыкания каждого из контактов в выходную линию из входной (при  $P_1 > P_2$ ) поступит масса газа

$$\Delta M = M_1 - M_2 = \frac{V_1}{RT} (P_1 - P_2).$$



### Рис. 6.15. Пневматическое линейное пульсирующее сопротивление ПС:

*a* – принципиальная схема ПС; *б* – принципиальная схема ПС;

*в* – схема аperiodического звена с ПС

Если же каждый из контактов замкнется  $n$  раз, то в выходную линию из входной поступит масса газа

$$M = n \Delta M = \frac{V_1 n}{RT} (P_1 - P_2). \quad (6.11)$$

Продифференцируем равенство (6.11) по времени, предполагая, что  $P_1$  и  $P_2$  в каждом импульсе остаются постоянными:

$$\frac{dM}{dt} = G = \frac{V_1}{RT} \frac{dn}{dt} (P_1 - P_2) = \frac{V_1 f}{RT} (P_1 - P_2);$$

здесь  $G$  – массовый расход газа;  $\frac{dn}{dt}$  – частота замыкания контактов 1 и 2 (частота открытия клапанов).

Если частота остается постоянной, то

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

где  $\alpha = \frac{V_1 f}{RT}$  – проводимость пульсирующего сопротивления, постоянная величина. Из этого выражения видно, что проводимость сопротивления является функцией частоты  $f$ . Следовательно, сопротивление работает в дискретном режиме с частотой  $f$  синхронизирующего сигнала и при достаточно высокой частоте приближается к непрерывному и работает с погрешностью 0,5 %.

Как следует из уравнения, пульсирующее сопротивление линейно при любых давлениях  $P_1$  и  $P_2$ .

Из сказанного ясно, что пульсирующее сопротивление позволяет работать во времени, протекающем как дискретно, так и с требуемым приближением непрерывно.

Проводимость сопротивления  $\alpha$  в реальном времени прямо пропорциональна частоте  $f$  сигнала управления и емкости  $V_1$ . Это позволяет изменять проводимость, изменяя частоту  $f$  и емкость  $V_1$ , т.е. управлять пульсирующим сопротивлением. Управляемость сопротивления дает возможность реализовать широкий класс линейных и нелинейных математических вычислительных операций, а также операции интегрирования и дифференцирования как дискретно, так и с требуемым приближением непрерывно во времени.

Например, на базе решающего усилителя, работающего в нормальном или высоком диапазоне рабочих давлений, можно построить с применением пульсирующего сопротивления все вычислительные устройства непрерывного действия, работающие в соответствующих диапазонах давлений.

К контактам сопротивления, работающим в дискретном режиме, предъявляют высокие требования: они должны обеспечивать герметичность и большое число безотказных срабатываний.

Принципиальная схема пульсирующего сопротивления представлена на рис. 6.15, б. Сопротивление содержит четыре мембраны, которые попарно соединены штоками. Малые жесткие центры совместно с соплами образуют пары сопло-заслонка (контакты 1 и 2). Мембраны делят корпус пульсирующего сопротивления на шесть камер. В камеры 4 и 9 заводится давление подпора, в камеру 6 – давление  $P_1$ , из камеры 7 воздух поступает в выходную линию. Управляющие импульсы давления поступают с выхода генератора прямоугольных импульсов в камеры 3 и 8. При отсутствии управляющего давления в камерах 3 и 8 нижнее сопло оказывается закрытым, а верхнее открытым, и происходит заполнение камеры 5 (емкости  $V_1$ ) до давления  $P_1$ . При подаче управляющего импульса состояние пар сопло-заслонка изменится на обратное и произойдет опорожнение камеры 5 (объема  $V_1$ ) в выходную линию до давления  $P_2$ .

Схема аperiodического звена с пульсирующим сопротивлением представлена на рис. 6.15, в.

Масса воздуха в объеме  $V$  будет

$$M = \rho V = \frac{P}{RT} V,$$

а расход в этот объем

$$\frac{dM}{dt} = G = \frac{V}{RT} \frac{dP}{dt}.$$

Тем обстоятельством, что объем пульсирующего дросселя суммируется с объемом аperiodического звена, мы пренебрегаем. С другой стороны, из уравнения для пульсирующего дросселя (6.11) следует, что

$$G = \frac{V_1}{RT} \frac{dn}{dt} (P_1 - P).$$

Приравнивая расходы, получим

$$N \frac{dP}{dn} + P = P_1, \quad (6.12)$$

где  $N = V/V_1$  – постоянная "времени";  $V_1$  – объем камеры пульсирующего сопротивления;  $n$  – дискретное "время" (число импульсов).

Если принять, что  $P_1$  с момента отсчета времени постоянно и больше начального давления  $P$  в камере (при  $n = 0$ ), то решение уравнения (6.12) будет

$$\bar{P} = \bar{P}_1 \left( 1 - e^{-\frac{n}{N}} \right).$$

Процессы, происходящие в рассмотренной ранее конструкции ППС, справедливы и для других конструкций.

На рис. 6.16 изображено пульсирующее пневматическое сопротивление с одним приводом и упругими соплами.

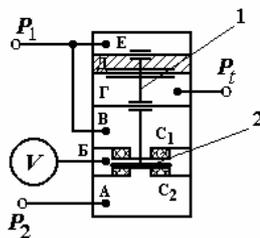
Устранение короткого замыкания достигается за счет предварительного сжатия исполнительного узла, соединяющего упругие сопла. Условием работоспособности является

$$ch_0 \geq \Delta p,$$

где  $c$  – жесткость упругих сопел, приведенная к эффективной площади средней камеры;  $h$  – перемещение упругих элементов, соответствующее их деформации при нейтральном положении управляющего узла.

Замыкание контактов требует совершения хода  $h_3 > h_0$ , так как только в этом случае между соплом и заслонкой появится зазор и контакты. Таким образом, для лететь перепад  $\Delta_3 =$  обеспечивающий проводимость

Если упругие элементы при деформированы, то схема не замыкания).



возрастает до  $\alpha_{\max}$  проводимость одного из замыкания контактов необходимо преодолеть  $= c(h_3 - h_0)$ , где  $(h_3 - h_0)$  – зазор, замкнутого контакта.

нейтральном положении привода не устраняет сквозного протока (короткого

ППС содержит трехмембранный трех-соединен двумя

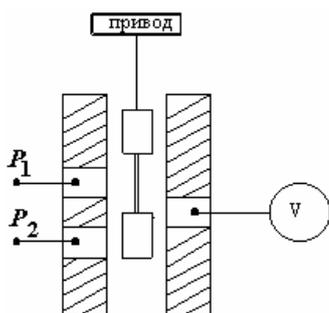


Рис. 6.17. Пульсирующее

Рис. 6.16. Схема пульсирующего сопротивления

привод, аналогичный мембранному блоку мембранную реле ППР.1, шток 1 которого с заслонкой 2, расположенной между предварительно деформированными упругими соплами  $C_1$  и  $C_2$ . Один вход  $P_1$  подключен в камеры В и Е, вход  $P_2$  подключен в камеру А к камере Б присоединена емкость  $V$ .

Тактовые импульсы давления  $P_t$  поступают в камеру Г. В камеру Д подаются давление подпора. При  $P_t = 0$ , под действием подпора сопло  $C_2$  закрыто, а емкость  $V$  через открытое сопло  $C_1$  соединена с входом  $P_1$ . Если  $P_t = 1$ , то сопло  $C_1$  закрыто заслонкой 2, а емкость  $V$  через открытое сопло  $C_2$  соединена с входом  $P_2$ . Таким образом, происходит дозированная передача газа с одного входа на другой. Такой процесс описывается аналогично изложенному выше.

Исключить короткое замыкание, т.е. сквозной проток газа, можно путем

применения золотниковых элементов. Одна из конструкций такого ППС приведена на рис. 6.17.

Привод управляется дискретным сигналом и, в зависимости от вида энергии этого сигнала, может быть пневматическим, гидравлическим, электрическим и т.д.

Плунжер золотниковой пары может занимать два положения, соединяя при этом линию  $P_1$  или  $P_2$  с емкостью  $V$ . Исключение короткого замыкания осуществляется за счет конструктивного выполнения золотниковой пары.

Кроме рассмотренных конструкций ППС существует ряд конструкций, особенностями которых является выполнение привода.

### Вопросы для самостоятельной работы студентов

1. Соединение каких элементов называется пневматической камерой?
  - а) пневматических емкостей;
  - б) пневматических конденсаторов;
  - в) пневматических сопротивлений и емкостей.
2. С какой целью в устройстве для запоминания непрерывных пневматических сигналов устанавливают емкость?
  - а) для естественной задержки выходного сигнала;
  - б) для повышения надежности процесса запоминания;
  - в) для линеаризации выходной характеристики.
3. Из каких элементов составлено устройство для запоминания непрерывных пневматических сигналов?
  - а) из двух пневматических клапанов;
  - б) из пневматического клапана и точного повторителя;
  - в) из двух повторителей.
4. Что происходит в устройстве для запоминания непрерывных пневматических сигналов при поступлении команды "сброс памяти"?
  - а) соединение выходной линии с атмосферой;
  - б) соединение входной линии с атмосферой;
  - в) соединение входа точного повторителя с линией входа.
5. Какое количество устройств запоминания непрерывных пневматических сигналов необходимо для задержки входного сигнала на такт?
  - а) два; б) три; в) четыре.
6. Для чего используют импульсаторы?
  - а) для генерации пневматических импульсов;
  - б) для интегрирования входных давлений;
  - в) для деформации пневматических дискретных сигналов.
7. Из каких элементов выполняют импульсаторы;
  - а) из пневматического реле и инерционного звена;
  - б) из двух пневматических реле;
  - в) из элемента сравнения и апериодического звена.
8. Нужно ли использовать давление питания в импульсаторах, смещающих фронты входного импульса с уменьшением его длительности?
  - а) нужно; б) не нужно; в) в некоторых случаях нужно.
9. Чем определяется длительность тактов импульсных сигналов на выходе генератора?
  - а) скоростью перемещения мембранного блока;
  - б) величиной постоянной времени инерционного звена, установленного в цепи положительной обратной связи;
  - в) значением давления подпора.
10. Изменится ли соотношение нулевого  $T_0$  и единичного  $T_1$  сигналов внутри такта при изменении проводимости  $\beta$  дросселя инерционного звена?
  - а) изменится;

- б) не изменится;
- в) практически не изменится.

11. Линейное изменение давления (при  $P_{\text{вх}} = \text{const}$ ) на выходе генератора непрерывно нарастающего давления обеспечивается:

- а) изменением объема емкости;
- б) сбросом части газа в атмосферу;
- в) поддержанием постоянным перепада давления на входном пневматическом сопротивлении.

12. С какой целью на выходе генератора непрерывно нарастающего давления установлен повторитель?

- а) для ограничения объема, в котором происходит накапливание газа;
- б) для создания  $R_{\text{вых}} \rightarrow \infty$ , где  $R_{\text{вых}}$  – выходное сопротивление генератора;
- в) для увеличения мощности выходного давления.

13. При каком условии происходит переключение триггера с отдельными входами?

- а) при равенстве входных давлений;
- б) при неравенстве входных давлений;
- в) при поочередном появлении единичных сигналов на входах триггера.

14. Цепь положительной обратной связи в мембранном триггере с отдельными входами позволяет ...

- а) исключить короткое замыкание;
- б) осуществить запоминание давления  $P_{\text{вых}} = 1$ ;
- в) осуществить запоминание давления  $P_{\text{вых}} = 0$ .

15. Сколько входов имеет пневматический триггер с отдельными входами?

- а) два; б) три; в) один.

16. При потере давления питания триггер с отдельными входами, выполненный на основе трехмембранного реле с фиксированным начальным состоянием, устанавливается в положение ...

- а)  $P_{\text{вых}} = 0$ ; б)  $P_{\text{вых}} = P_1$ ; в)  $P_{\text{вых}} = P_2$ .

17. Проводимость пневматического пульсирующего сопротивления пропорциональна ...

- а) частоте сигнала управления;
- б) емкости, входящей в состав пульсирующего сопротивления;
- в) а) и б).

18. Каким образом влияет на проводимость пульсирующего сопротивления разность  $\Delta P$  давлений на входе и выходе?

- а) с увеличением  $\Delta P$  проводимость увеличивается;
- б) с увеличением  $\Delta P$  проводимость уменьшается;
- в)  $\Delta P$  не влияет на проводимость пульсирующего сопротивления.

19. За счет чего устраняется короткое замыкание в пульсирующем сопротивлении с упругими соплами?

- а) за счет давления подпора;
- б) за счет предварительного сжатия упругих сопел;
- в) за счет изменения скорости перемещения исполнительного узла.

20. Основное достоинство пульсирующих сопротивлений это ...

- а) получение пульсирующего сигнала;
- б) линейная зависимость расхода воздуха через пульсирующее сопротивление от перепада давления;
- в) экономичность.

21. Какие Вы знаете схемы включения элементов сравнения, выполняющие операцию умножения входного давления на коэффициент больше единицы?

22. Какие Вы знаете схемы включения элементов сравнения, выполняющие операцию умножения входного давления на коэффициент меньше единицы?

23. На основании каких законов выводится уравнение равновесия мембранного блока элемента сравнения?

24. Как формируется отрицательная обратная связь в элементе сравнения?

25. Каким типовым звеном представляется элемент сравнения на структурной схеме?

26. При выполнении каких условий уравнением равновесия мембранного блока элемента сравнения является равенство нулю алгебраической суммы входных давлений?
27. Какими типовыми звеньями представляется дроссельный делитель на структурной схеме?
28. Почему в статике выходной сигнал элемента сравнения, в отрицательную обратную связь которого включен дроссельный делитель, больше входного?
29. Какую функцию выполняет мембранный блок в элементе сравнения?
30. Какую функцию выполняют дроссели типа "сопло-заслонка" в элементе сравнения?
31. Как доказать, что элемент сравнения на структурной схеме представляется усилительным звеном с большим коэффициентом усиления?
32. Какова структурная схема устройства, выполняющего операцию умножения входного давления на коэффициент больше единицы?
33. Какова структурная схема устройства, выполняющего операцию умножения входного давления на коэффициент меньше единицы?
34. Какова структурная схема устройства, сравнивающего два давления?
35. Какова структурная схема устройства, определяющего сумму двух давлений?
36. Какова структурная схема устройства, определяющего разность двух давлений?

## 7. АНАЛОГОВЫЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ИНТЕГРИРУЮЩИЕ И ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Аналоговые пневматические интегрирующие и дифференцирующие устройства широко используются при построении различных средств пневмоавтоматики, таких как регуляторы общепромышленного назначения, устройства контроля веществ и др. Знание физики и теории процессов, происходящих в пневматических вычислительных устройствах при формировании в них соответствующих выходных сигналов, позволит творчески подходить к разработке соответствующих технических средств автоматизации.

### 7.1. Аналоговые пневматические интегрирующие устройства

Все аналоговые интегрирующие пневматические устройства можно разделить на устройства разомкнутого и замкнутого типа в зависимости от того, используется ли в схеме устройства обратная связь.

*Аналоговые пневматические интегрирующие устройства разомкнутого типа.* Основным методом пневматического интегрирования – накопление количества воздуха (пневматического заряда) в пневматической емкости.

Простейшим пневматическим интегрирующим устройством разомкнутого типа является глухая пневматическая камера (рис. 7.1). Интегрирующие устройства разомкнутого типа называют также пассивными.

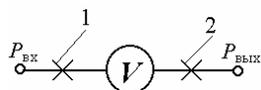
При условии если входной дроссель 2 будет полностью закрыт, проточная камера превратится в глухую. Дифференциальное уравнение глухой пневматической камеры с линейным входным сопротивлением имеет вид

$$T \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} + P_{\text{ВЫХ}} = kP_{\text{ВХ}}, \quad (7.1)$$

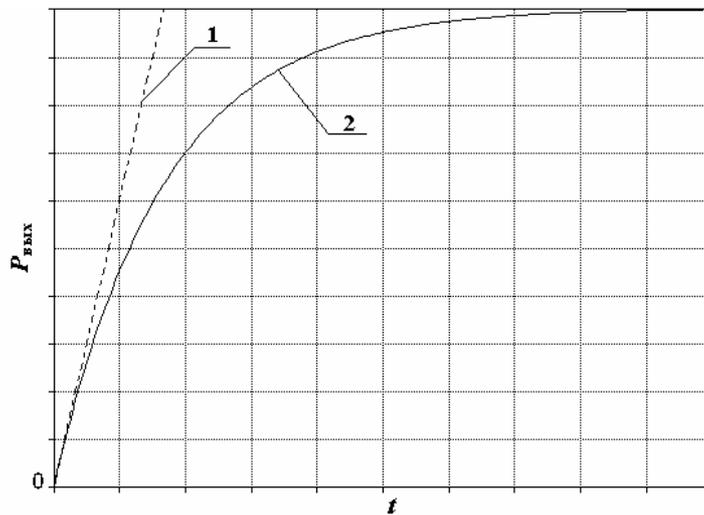
где  $P_{\text{ВЫХ}}$  – давление воздуха в проточной камере;  $T$  – коэффициент при производной выходной величине, называемый постоянной времени апериодического звена;  $k$  – коэффициент усиления на входе.

Интегралом уравнения (7.1) при увеличении входного давления скачком от нуля до  $P_{\text{ВХ}}$  является выражение

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ}} (1 - e^{-t/T}). \quad (7.2)$$



**Рис. 7.1. Принципиальная схема апериодического звена первого порядка:**  
V – камера; 1, 2 – дроссели



**Рис. 7.2. Выходные сигналы идеального интегратора и аperiodического пневматического звена**

Кривая 2, построенная по выражению (7.2), дана на рис. 7.2. На том же графике показано изменение давления на выходе идеального интегрирующего устройства при том же постоянном значении входного сигнала. Выходной сигнал идеального интегратора в этом случае будет иметь вид

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ}} \cdot t / T, \quad (7.3)$$

т.е. получаем уравнение прямой 1, выходящей из начала координат.

Из рассмотрения выходных сигналов идеального интегратора и аperiodического пневматического звена следует, что последнее обладает ограниченным временем интегрирования входных сигналов, так как с увеличением времени увеличивается разность сигналов аperiodического звена и идеального интегратора, что приводит к увеличению методической погрешности интегрирования. Оценить величину  $\Delta P_{\text{ВЫХ}}(t)$  абсолютной ошибки при скачкообразном изменении входного сигнала можно по разности сигналов, описываемых (7.2) и (7.3), в один и тот же момент времени

$$\Delta P_{\text{ВЫХ}}(t) = P_{\text{ВХ}}(t/T) - P_{\text{ВХ}}(1 - e^{-t/T}).$$

Используя разложения функции  $e^{-t/T}$  в степенной ряд и ограничиваясь первыми членами разложения, получим

$$\Delta P_{\text{ВЫХ}}(t) \approx (P_{\text{ВХ}} / 2) (t/T)^2. \quad (7.4)$$

Из (7.4) следует, что увеличение постоянной времени аperiodического звена уменьшает погрешность интегрирования и тем самым позволяет увеличить допустимое (до заданной величины абсолютной ошибки) время интегрирования. Введение обратной связи, приводящее к созданию устройств замкнутого типа, позволяет существенно увеличить точность интегрирования, за счет исключения методической ошибки интегрирования.

*Аналоговые пневматические интегрирующие устройства замкнутого типа.* Пневматические интегрирующие устройства могут быть построены с применением как положительной, так и отрицательной обратной связи. Принцип положительной обратной связи используется обычно при создании интеграторов на основе аperiodического звена.

Интегрирующие устройства такого типа входят в состав И-, ПИ- и ПИД-регуляторов. Зависимость входной величины  $P_{\text{ВХ}}$  и выходной  $P_{\text{ВЫХ}}$  в интегрирующем звене характеризуется уравнениями

$$T_{\text{И}} \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} = k P_{\text{ВХ}}.$$

При  $k = 1$

$$T_{\text{И}} \frac{dP_{\text{ВЫХ}}}{dt} = P_{\text{ВХ}},$$

тогда

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{T_{\text{И}}} \int P_{\text{ВХ}} dt.$$

Интегрирующее звено обладает астатизмом, так как в установившемся режиме отсутствует однозначная зависимость между выходной и входной величинами. При скачкообразном входном воздействии выходная величина неограниченно возрастает или убывает, не приходя к установившемуся значению.

Интегрирующее звено для интегрирования разности входных давлений построено на основе четырехходового усилителя, работающего в режиме сумматора и апериодического звена, охваченного положительной обратной связью (рис. 7.3).

Работа интегрирующего звена описывается уравнением

$$P_{\text{вых}} = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int (P_1 - P_2) dt, \quad T_{\text{и}} = \frac{V}{\beta RT}.$$

Если  $P_1 - P_2 = \text{const}$ , то  $P_{\text{вых}} = (\Delta P / T_{\text{и}}) t$  и давление на выходе будет изменяться во времени по линейному закону. Когда давление на выходе ( $P_{\text{вых}}$ ) становится равным входному сигналу типа единичного скачка  $\Delta P$ , время, прошедшее с момента появления сигнала  $\Delta P$ , станет равным постоянной времени интегратора, т.е.  $t = T_{\text{и}}$ .

Величина постоянной определяется значением величины емкости  $V$ .

Передаточная функция по схеме рис. 7.3, вычисляется по

$$W(s) = \frac{1}{T_{\text{и}} S}.$$

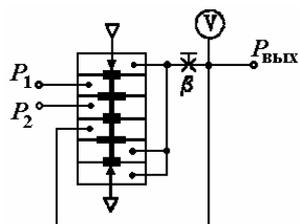


Рис. 7.3. Схема интегрирующего устройства замкнутого типа на четырехходовом усилителе

времени интегрирующего звена проводимости переменного дросселя и интегрирующего звена, построенного по формуле

## 7.2. АНАЛОГОВЫЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Дифференцирующие устройства применяются при реализации ПД- и ПИД-законов регулирования. Зависимость между входной  $P_{\text{вх}}$  и выходной  $P_{\text{вых}}$  величинами характеризуется уравнением

$$P_{\text{вых}} = k \frac{dP_{\text{вх}}}{dt}.$$

Уменьшение выходной величины происходит по экспоненте до ее начального значения, которое достигает при  $t \rightarrow \infty$ . Влияние апериодической составляющей тем меньше, чем меньше постоянная времени  $T_{\text{д}}$ . При  $T_{\text{д}} \geq 0$ , но при конечном значении произведения  $k T_{\text{д}}$ , получается идеальное дифференцирующее звено с коэффициентом усиления  $k T_{\text{д}}$ .

При бесконечном увеличении  $T_{\text{д}}$  звено превращается в усилительное с коэффициентом передачи  $k$ .

Дифференцирующее звено построено на двух четырехходовых усилителях (рис. 7.4).

В этой схеме дифференцируемой величиной является входной сигнал  $P_1$ , а условным уровнем отсчета – величина давления  $P_2$ .

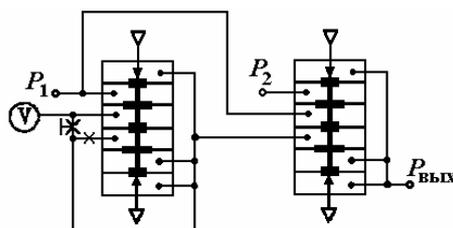


Рис. 7.4. Схема реализации дифференцирующего звена на четырехходовых усилителях

Выходное давление в переходном режиме пропорционально скорости изменения основного входного давления  $P_1$  и величине независимого входного давления  $P_2$ :

$$P_{\text{вых}} = T_{\text{д}} dP_1/dt + P_2.$$

В статическом режиме на выходе формируется давление  $P_2$ .

Время дифференцирования можно менять путем настройки проводимости дросселя и емкости  $V$  в пределах от 3 с до 10 мин. Передаточная функция звена, построенного по этой схеме (рис. 7.4), выглядит

$$W(s) = T_d S .$$

### 7.3. ПНЕВМАТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ПРЕДВАРЕНИЯ

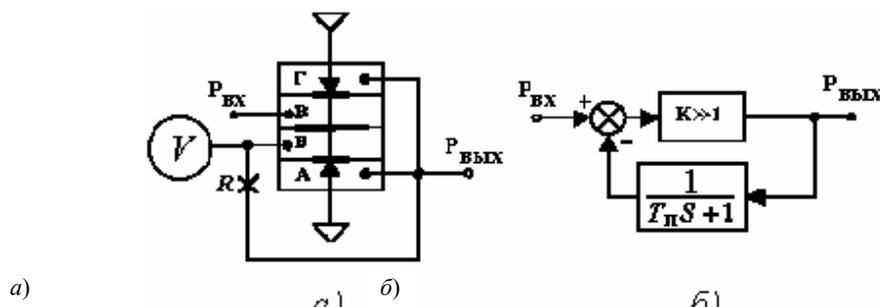
В автоматике наряду с дифференцирующими устройствами широко применяют устройства предварения, реализующие операцию, описываемую уравнением

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ}} + T_{\text{П}} \left( \frac{dP_{\text{ВХ}}}{dt} \right), \quad (7.5)$$

где  $T_{\text{П}}$  – время предварения (постоянная времени дифференцирования).

Операция дифференцирования отличается от операции предварения тем, что выходное давление при дифференцировании стремится к нулю, а при предварении – к значению входной величины.

На рис. 7.5 показано устройство предварения, реализованное на базе двухвходового усилителя, в отрицательную обратную связь которого включено апериодическое звено, состоящее из сопротивления  $R$  и емкости  $V$ .



**Рис. 7.5. Схема пневматического устройства предварения:**

*a* – принципиальная пневматическая схема;

*б* – структурная схема

Равновесие мембранного блока усилителя наступает при равенстве давлений в камерах Б и В, т.е.  $P_{\text{Б}} = P_{\text{В}}$ . Давление в камере В равно  $P_{\text{ВХ}}$ , а давление в камере Б определяется из дифференциального уравнения для апериодического звена, т.е.

$$T \frac{dP_{\text{Б}}}{dt} + P_{\text{Б}} = P_{\text{ВЫХ}}, \quad (7.6)$$

где  $T$  – постоянная времени апериодического звена.

Учитывая, что при большом коэффициенте усиления  $P_{\text{Б}} = P_{\text{В}} = P_{\text{ВХ}}$ , из уравнения (7.6) при условии, что  $T = T_{\text{П}}$ , получим зависимость (7.5).

#### Вопросы для самостоятельной работы студентов

1. При каких условиях справедливо описание состояния газа в емкости, входящей в состав интегрирующего звена, уравнением Менделеева-Клапейрона?
2. Какие Вы знаете примеры использования в технике интегрирующего звена?
3. Какие Вы знаете примеры использования в технике дифференцирующего звена?
4. С какой целью в схеме интегрирующего звена введена положительная обратная связь?
5. С какой целью в дифференцирующем устройстве (рис. 7.4) на вход одного из элементов сравнения подается постоянное давление  $P_2$ ?

6. В чем состоит основное отличие операции дифференцирования от операции предварения?
7. К какому давлению стремится выходной сигнал звена предварения при  $t \rightarrow \infty$  ?
8. К какому давлению стремится выходной сигнал дифференцирующего звена при  $t \rightarrow \infty$  ?

## 8. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Элементы УСЭППА широко применяют при изготовлении пневматических средств, реализующих все типовые законы регулирования. Эти средства называются пневматическими регуляторами системы "Старт". Целью изучения регуляторов является приобретение теоретических знаний и практических навыков, которые позволят грамотно эксплуатировать, настраивать и ремонтировать пневматические регуляторы общепромышленного назначения [9].

### 8.1. ПОЗИЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР ПР 1.5-М1

Позиционный регулятор типа ПР 1.5-М1 относится к приборам системы "Старт", построенных на элементах УСЭППА, и предназначен для реализации двухпозиционных систем автоматического регулирования и схем сигнализации [8, 9].

Позиционный регулятор реализует закон регулирования вида

$$\begin{cases} P_{\text{вых}} = 0 & \text{при } P_{\text{п}} < P_3, \\ P_{\text{вых}} = 1 & \text{при } P_{\text{п}} > P_3 \end{cases} \quad \text{при настройке на максимум;}$$

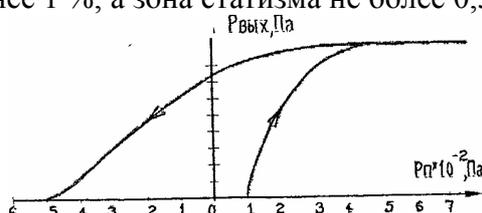
$$\begin{cases} P_{\text{вых}} = 0 & \text{при } P_{\text{п}} > P_3, \\ P_{\text{вых}} = 1 & \text{при } P_{\text{п}} < P_3 \end{cases} \quad \text{при настройке на минимум,}$$

где  $P_{\text{вых}}$  – значение выходного сигнала;  $P_{\text{п}}$  – значение сигнала регулируемой величины, поступающего с измерительного преобразователя;  $P_3$  – заданное значение регулируемой величины.

Так как регуляторы, реализующие такой закон регулирования, имеют большую инертность, их рекомендуется применять на объектах с самовыравниванием, для которых отношение времени запаздывания к постоянной времени объекта больше 0,2.

Отклонение от принятого закона может быть вызвано в статическом режиме гистерезисом чувствительного элемента, конечным коэффициентом усиления элемента сравнения, неравенством площадей мембран и т.д. В динамическом режиме отклонение от принятого закона может быть вызвано быстрым действием элемента сравнения и усилителя мощности.

Экспериментальная статическая характеристика приведена на рис. 8.1. Она практически близка к релейной: ширина зоны возврата менее 1 %, а зона статизма не более 0,5 %.



**Рис. 8.1. Экспериментальная статическая характеристика регулятора ПР 1.5-М1**

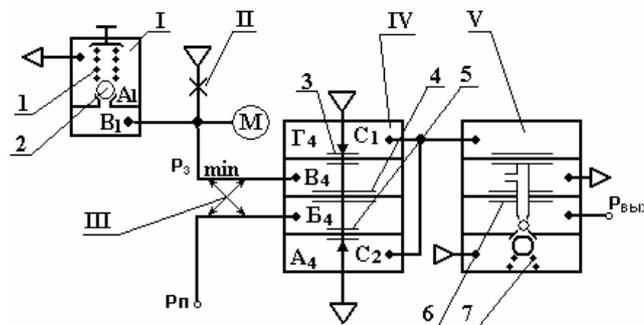
Динамические характеристики прибора оцениваются по быстродействию и допустимой скорости изменения входного сигнала. Дополнительная динамическая погрешность не более 1 % при скорости изменения входного сигнала менее  $0,8 \cdot 10^5$  Па/с.

При выходе регулируемого параметра за установленное значение регулятор выдает дискретные пневматические сигналы 0 или 1.

Давление на выходе регулятора при его срабатывании обычно используется для подачи на исполнительный механизм или для приведения в действие звукового или светового сигнала.

Принципиальная схема позиционного регулятора представлена на рис. 8.2. Принцип действия основан на сравнении двух давлений  $P_3$  и  $P_п$ .

Задатчик I и постоянный дроссель II предназначены для изменения давления в камере задания элемента сравнения IV. Задатчик I имеет пружину 1 и шариковый клапан 2, через который воздух из камеры В1 сбрасывается в камеру А1 и далее в атмосферу. Вращая ручку задатчика и изменяя усилие натяжения пружины 1, можно настраивать его выходное давление в пределах 0,02...0,14 МПа. Для контроля заданного значения параметра служит манометр М.



**Рис. 8.2. Принципиальная схема регулятора ПР 1.5-М1:**

- I – задатчик; II – постоянный дроссель; III – переключатель "min-max";
- IV – элемент сравнения; V – усилитель мощности; М – манометр;
- C1, C2 – сопла; 1 – пружина; 2, 7 – шариковый клапан; 3 – 6 – мембраны

Настройка работы регулятора "на минимум" или "на максимум" выполняется поворотом диска III. При настройке регулятора "на максимум" текущее значение измеряемого параметра в виде давления сжатого воздуха  $P_п$  поступает в камеру В4 элемента сравнения IV. Заданное давление  $P_3$ , установленное задатчиком I, подводится к камере Б4 элемента IV.

При работе регулятора "на минимум" заданное давление  $P_3$  подается в камеру В4, а давление от измерительного блока  $P_п$  – в камеру Б4. Сравнение происходит в трехмембранном элементе сравнения IV (пневматическом усилителе давления), который состоит из двух пневматических сопротивлений типа "сопло-заслонка" (сопла C1, C2 и шток мембранного блока) и мембранного блока, образующего вместе с корпусом глухие камеры. Мембранный блок содержит три эластичные мембраны, соединенные общим штоком, торцы которого и служат заслонками сопел.

Мембранный блок может перемещаться в вертикальном направлении. Его движение останавливается, когда торец штока упирается в сопло. Эффективные площади мембран 3, 5 равны друг другу и значительно меньше эффективной площади мембраны 4. Камеры А4 и Г4, в которых располагаются сопла, соединяются последовательно и образуют тем самым проточную камеру с двумя управляемыми пневматическими сопротивлениями. К соплу C1 подводится давление питания  $P_{пит}$ , сопло C2 сообщается с атмосферой.

Усилитель мощности предназначен для повторения входного сигнала и усиления его по мощности (расходу воздуха). Усилители применяются в качестве выходных элементов в большинстве приборов, построенных из элементов УСЭША.

В связи с тем, что в таком усилителе мембранный блок собран из грубых (менее чувствительных) мембран и не разгружен от действия посторонних усилий, повторение сигнала осуществляется со значительной статической ошибкой (до 5 % от стандартного диапазона пневматических сигналов). В то же время большие проходные сечения шариковых клапанов обеспечивают усилителю высокие динамические свойства.

## 8.2. ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР ПР 2.8-М1

Пропорциональный регулятор предназначен для получения непрерывного регулирующего воздействия на исполнительный механизм с целью поддержания заданной величины регулируемого параметра. На элементах УСЭППА можно реализовать несколько видов пропорциональных регуляторов [7, 9]. Одним из наиболее распространенных является регулятор ПР 2.8-М1, выполняющий операцию

$$P_{\text{вых}} = K_p (P_{\text{п}} - P_3) + P_0,$$

где  $K_p$  – коэффициент пропорциональности регулятора;  $P_{\text{п}}$  – давление, пропорциональное величине параметра;  $P_3$  – заданное значение регулируемой величины;  $P_0$  – давление контрольной точки, поступающее от задатчика ЗД.

Практически принято коэффициент пропорциональности регулятора  $K_p$  выражать через диапазон дросселирования  $\delta$ , %.

Диапазон дросселирования (ДД) показывает, на сколько процентов должен изменяться параметр относительно диапазона шкалы вторичного прибора, чтобы вызвать перемещение регулирующего органа из одного крайнего положения в другое.

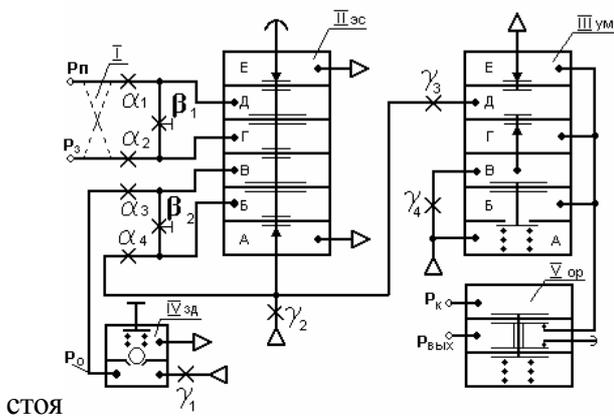
Принципиальная схема регулятора ПР 2.8-М1 приведена на рис. 8.3.

Регулятор состоит из пятимембранного элемента сравнения ЭС, повторителя усилителя мощности УМ, отключающего реле ОР, постоянных и переменных дросселей. Капилляр постоянного дросселя  $\gamma_4$  встроен в повторитель-усилитель мощности, а капилляр дросселя  $\gamma_3$  впаян во входную трубку этого же элемента.

Отличительной особенностью этого регулятора является наличие двух дроссельных сумматоров в прямом канале и в линии обратной связи. Такая схема регулятора дает возможность улучшить качество настройки коэффициента усиления и получить достаточно высокую линейность статических характеристик.

Дроссельный сумматор, состоящий из постоянных дросселей  $\alpha_1, \alpha_2$ , и переменного дросселя  $\beta_1$ , включен во входную линию элемента сравнения ПЭС и служит для настройки предела пропорциональности в диапазоне 100...3000 %.

Второй дроссельный сумматор, со-



**Рис. 8.3. Принципиальная схема регулятора ПР 2.8-М1**

стоящий из постоянных дросселей  $\alpha_3, \alpha_4$  и переменного дросселя  $\beta_2$ , включен в линию отрицательной обратной связи элемента сравнения и служит для настройки диапазона дросселирования от 2 до 100 %. Для настройки ДД от 100 до 3000 % головку дросселя  $\beta_2$  ставят на отметку 100 %, что соответствует его закрытию, а дросселя  $\beta_1$  – на требуемую отметку. При настройке предела пропорциональности от 2 до 100 % необходимо закрыть дроссель  $\beta_1$  (поставить на отметку 100 %), а головку дросселя  $\beta_2$  – на требуемую отметку.

Условие равновесия мембранного блока элемента сравнения записывается в виде

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

где  $P_{\text{Д}}, P_{\text{Г}}, P_{\text{В}}, P_{\text{Б}}$  – давление в соответствующих камерах элемента сравнения.

Рассмотрим два случая работы регулятора.

В первом случае закроем дроссель  $\beta_2$ . Справедливы равенства  $P_B = P_{\text{вых}}$  и  $P_B = P_0$ , поэтому

$$P_{\text{вых}} = P_D - P_\Gamma + P_0.$$

Давления  $P_D, P_\Gamma$  определим с использованием формул для дроссельных сумматоров:

$$P_D = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1} P_{\text{п}} + \frac{\beta_1}{\alpha_1 + \beta_1} P_\Gamma;$$

$$P_\Gamma = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_1} P_3 + \frac{\beta_1}{\alpha_2 + \beta_1} P_D.$$

С учетом равенства  $\alpha_1 = \alpha_2$  получим

$$P_D - P_\Gamma = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + 2\beta_1} (P_{\text{п}} - P_3).$$

Тогда  $P_{\text{вых}} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + 2\beta_1} (P_{\text{п}} - P_3) + P_0.$

Во втором случае закроем дроссель  $\beta_1$ . Давления в камерах Д и Г элементы сравнения будут равны соответственно давлениям  $P_{\text{п}}$  и  $P_3$ :

$$P_D = P_{\text{п}}; \quad P_\Gamma = P_3.$$

Давления  $P_B$  и  $P_{\text{Б}}$  определим как давления на выходах соответствующих дроссельных сумматоров:

$$P_B = \frac{\alpha_3}{\alpha_3 + \beta_2} P_0 + \frac{\beta_2}{\alpha_3 + \beta_2} P_{\text{Б}};$$

$$P_{\text{Б}} = \frac{\alpha_4}{\alpha_4 + \beta_2} P_{\text{вых}} + \frac{\beta_2}{\alpha_4 + \beta_2} P_B.$$

При равенстве  $\alpha_3 = \alpha_4$  определим разность давлений

$$P_B - P_{\text{Б}} = \frac{\alpha_3}{\alpha_3 + 2\beta_2} (P_0 - P_{\text{вых}}).$$

Тогда  $P_{\text{вых}} = \frac{\alpha_3 + 2\beta_2}{\alpha_3} (P_0 - P_{\text{Б}}) + P_{\text{Б}}.$

Таким образом, коэффициент пропорциональности регулятора в зависимости от диапазона дросселирования принимает следующие значения:

$$K_p = \begin{cases} \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + 2\beta_1} & \text{при ДД от 100 до 3000 \%;} \\ \frac{\alpha_3 + 2\beta_2}{\alpha_3} & \text{при ДД от 2 до 100 \%}. \end{cases}$$

Задатчиком  $z_d$  выставляется начальное значение выходного значения регулятора, соответствующее номинальному положению регулирующего органа.

### 8.3. ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР ПР 3.31-М1

Регулятор ПР 3.31-М1 с некоторой динамической ошибкой реализует ПИ-закон регулирования. Принципиальная схема регулятора приведена на рис. 8.4.

Регулятор состоит из пятимембранного 1 и трехмембранного 2 элементов сравнения, повторителя 3, повторителя усилителя мощности 4, переменных и постоянных дросселей, входящих в дроссельные

сумматоры 9, 10. Кроме того, в регулятор входят дискретные элементы – выключающие реле 5 и 6, которые необходимы для перехода с автоматического на ручное управление и наоборот. Постоянный дроссель 12 встроен в повторитель-усилитель мощности, а капилляр дросселя 11 впаян во входную трубку этого же элемента. Дроссели 13, 14 установлены в цепи питания.

Первый каскад для формирования интегральной составляющей реализован по схеме охвата аperiodического звена "дроссель – емкость" 7, 8 единичной положительной обратной связью.

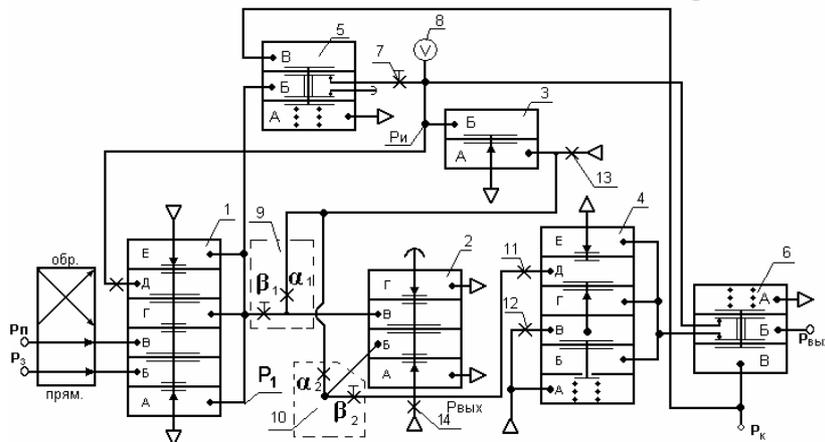


Рис. 8.4. Принципиальная схема регулятора ПР 3.31-М1

Второй каскад для формирования пропорциональной составляющей выполнен на базе разностного усилителя давления 2, в прямом канале и в цепи обратной связи которого установлены дроссельные сумматоры 9 и 10.

Сигнал  $P_n$ , пропорциональный регулируемому параметру, подводится к камере В элемента сравнения 1, а сигнал от датчика  $P_3$  – к камере Б. С выхода элемента 1 давление  $P_1$  поступает на входы пропорционального и интегрального каскадов. Интегральный каскад вырабатывает сигнал

$$P_{и} = \frac{1}{T} \int_0^t (P_n - P_3) dt,$$

где  $T$  – постоянная времени интегрирования. Сигнал  $P_{и}$  возвращается на элемент сравнения 1 в камеру Д положительной обратной связью. Таким образом, на выходе элемента 1 формируется алгебраическая сумма трех давлений

$$P_1 = P_n - P_3 + P_{и}.$$

Сигналы  $P_1$  и  $P_{и}$  через дроссельные сумматоры 9 и 10 поступают на вход разностного усилителя 2, охваченного отрицательной обратной связью, через один из входов дроссельного сумматора 10. Полагая, что разностный усилитель обладает большим коэффициентом усиления, в линейном приближении условие равновесия этого элемента запишется в виде

$$K_1 P_1 + (1 - K_1) P_{и} = K_2 P_{вых} + (1 - K_2) P_{и}.$$

Откуда с учетом значений  $P_1$  и  $P_{и}$

$$P_{вых} = \frac{K_1}{K_2} (P_n - P_3) + \frac{1}{T} \int_0^t (P_n - P_3) dt,$$

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

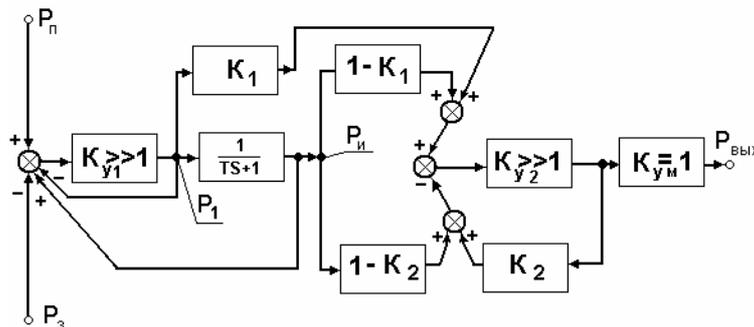
Таким образом, регулятор ПР 3.31-М1 имеет независимые друг от друга настройки пределов пропорциональности и времени интегрирования. Структурная схема регулятора ПР 3.31-М1 представлена на рис. 8.5. Выражение для значения выходного сигнала может быть получено следующим образом:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{K_{y2} K_{y.M}}{1 + K_{y2} K_{y.M} K_2} \times \left[ K_1 \frac{T_S + 1}{T_S} (P_n - P_3) + \frac{1 - K_1}{T_S} (P_n - P_3) - \frac{1 - K_2}{T_S} (P_n - P_3) \right] \Big|_{\substack{K_{y2} \gg 1 \\ K_{y.M} = 1}} = \frac{1}{K_2} \left( K_1 + \frac{K_2}{T_S} \right) (P_n - P_3) = \left( \frac{K_1}{K_2} + \frac{1}{T_S} \right) (P_n - P_3).$$

Отсюда передаточная функция

$$W(s) = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_n - P_3} = K_p + \frac{1}{T_S},$$

где  $K_p = \frac{K_1}{K_2}$ .



**Рис. 8.5. Структурная схема регулятора ПР 3.31-М1**

Параметрами настройки регулятора ПР 3.31-М1 является диапазон дросселирования  $\delta = \left( \frac{1}{K_p} \right) \cdot 100 = \frac{K_2}{K_1} \cdot 100 \%$  и постоянная интегрирования  $T$ . Изменение проводимости переменного дросселя 7 обеспечивает настройку постоянной интегрирования от 0,05 до 100 мин.

Когда дроссель закрыт, время интегрирования достигает максимального значения, а регулятор при этом превращается в пропорциональный. Полное открытие дросселя соответствует минимальному времени интегрирования.

Для установки диапазона дросселирования от 2 до 100 % переменный дроссель  $\beta_1$  сумматора 9 необходимо поставить на отметку 100 %, что соответствует полному его открытию ( $K_1 = 1$ ), а переменный дроссель  $\beta_2$  сумматора 10 устанавливают на требуемую отметку.

Для установки диапазона дросселирования от 250 до 3000 % на отметку 100 % устанавливают переменный дроссель  $\beta_2$  сумматора 10, а на требуемую отметку устанавливают дроссель  $\beta_1$  сумматора 9.

За счет введения двух органов настройки коэффициента усиления, один из которых установлен в прямом канале, а другой – в обратной связи, удалось получить линейные статические характеристики регулятора.

#### 8.4. ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР ПР 3.35-М1

Регулятор ПР 3.35-М1 реализует ПИД-закон регулирования с некоторой динамической ошибкой.

Регулятор содержит три блока: пропорциональный, интегральный и предварения. Регулятор (рис. 8.6) содержит трехмембранный 1 и два пятимембранных 2 и 3 элемента сравнения, точный повторитель 4, емкости 5 и 6, переменные дроссели 7–10, постоянные дроссели 11–17, усилитель мощности 18, выключающие реле 19–21, пневмоемкость с сильфоном 22.

Пропорциональный блок построен на элементе сравнения 2, переменных дросселях 9 и 10, дросселях 11–15.

Интегральный блок построен на элементе сравнения 3, переменном дросселе 8, емкости 6, повторителе 4 и дросселе 17. Блок предварения содержит элемент сравнения 1, емкость 5, переменный дроссель 7, дроссель 16, пневмоемкости с сильфоном 22.

Определим выходное давление  $P_d$  блока предварения. Запишем уравнение равновесия мембранного блока элемента сравнения 1 и дифференциальное уравнение, описывающее апериодическое звено, собранное на дросселе 7 и емкости 5.

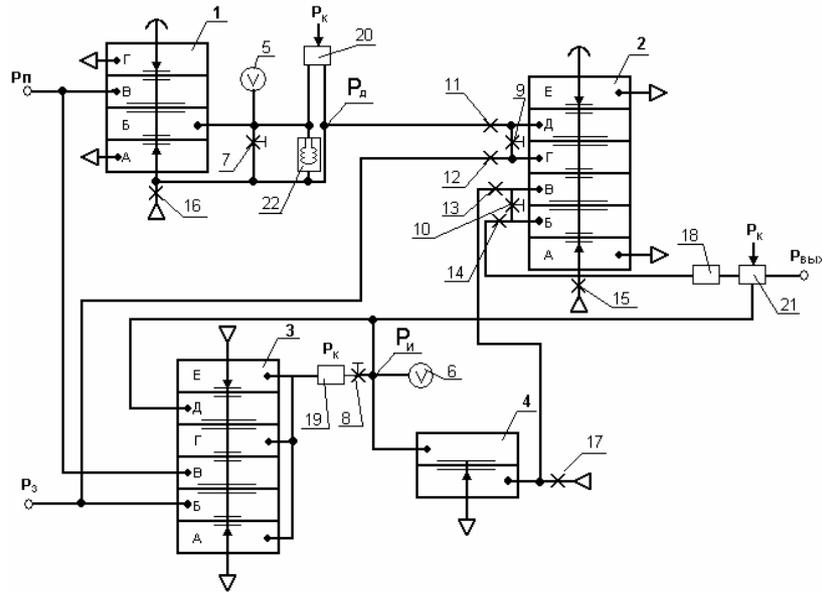


Рис. 8.6. Принципиальная схема регулятора ПР 3.35-М1

$$P_B = P_B; \quad P_B = P_n; \\ P_d = P_B + T_n \frac{dP_B}{dt}; \quad T_n = \frac{V_5}{\alpha_7 R \Theta},$$

где  $T_n$  – постоянная блока предварения;  $V_5$  – объем емкости 5;  $\alpha_7$  – проводимость дросселя 7;  $R$  – газовая постоянная;  $\Theta$  – температура газ в емкости.

Из приведенных уравнений получим

$$P_d = P_n + T_n \frac{dP_n}{dt}.$$

Интегральный блок реализует следующий закон

$$P_n = \frac{1}{T_i} \int_0^t (P_n - P_3) dt; \quad T_i = \frac{V_6}{\alpha_8 R \Theta},$$

где  $T_i$  – постоянная интегрального блока;  $\alpha_8$  – проводимость дросселя 8;  $V_6$  – объем емкости 6.

Выходной сигнал  $P_{\text{вых}}$  элемента сравнения 2 запишем в следующем виде

$$P_{\text{вых}} = K(P_d - P_3) + P_i,$$

где коэффициент  $K$  зависит от проводимости дросселей 9–14.

Подставив в это уравнение полученные значения  $P_d$  и  $P_i$ , получим

$$P_{\text{вых}} = K(P_n - P_3) + \frac{1}{T_i} \int_0^t (P_n - P_3) dt + KT_n \frac{dP_n}{dt}.$$

При поступлении командного сигнала  $P_k = 1$  срабатывает реле 19, 20 и 21. Выключающее реле 19 разрывает связь между выходом элемента сравнения 3 и входом в апериодическое звено, построенное на дросселе 8 и емкости 6. Прекращается процесс интегрирования.

Реле 20 соединяет камеру Б элемента 1 с выходом блока предварения  $P_d$ . Процесс предварения прекращается. Выходной сигнал  $P_d$  становится равным переменной  $P_n$ . Реле 21 отсоединяет выход усилителя мощности 18 от выходного штуцера регулятора и присоединяет к нему выход интегрального звена [9].

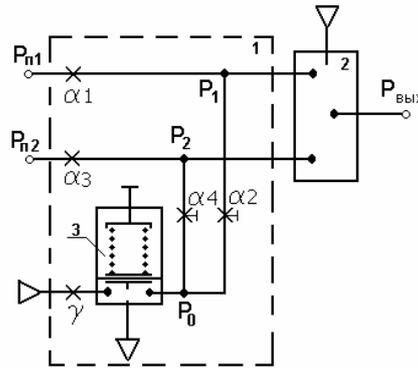
## 8.5. ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ СООТНОШЕНИЯ ДВУХ ПАРАМЕТРОВ

В некоторых случаях согласно технологии необходимо поддерживать постоянное отношение одного технологического параметра к другому. Наиболее часто такая задача встречается при регулировании соотношения двух расходов технологических жидкостей.

Реализация этой задачи осуществляется с помощью регулятора соотношения, который состоит из устройства соотношения 1 и ПИ-регулятора 2 (рис. 8.7).

На вход регулятора соотношения поступают давления  $P_{п1}$  и  $P_{п2}$ , пропорциональные технологическим параметрам, а на выходе регулятора формулируется сигнал  $P_{ввых}$ :

$$P_{\text{ввых}} = K(p_1 - p_2) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^t (p_1 - p_2) dt .$$



**Рис. 8.7. Схема пневматического регулятора соотношения**

Давления  $P_{п1}$  и  $P_{п2}$  поступают на входы двух сумматоров давлений, построенных на дросселях  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , и  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  соответственно.

Сопротивление делителей имеет линейную характеристику, поэтому

$$P_1 = K_1 P_{п1} + (1 - K_1) P_0 = K_1 (P_{п1} - 0,02) + 0,02 ;$$

$$P_2 = K_2 P_{п2} + (1 - K_2) P_0 = K_2 (P_{п2} - 0,02) + 0,02 ,$$

где  $K_1$ ,  $K_2$  – коэффициенты;  $P_0 = 0,02$  МПа.

$$K_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} ; \quad K_2 = \frac{\alpha_3}{\alpha_3 + \alpha_4} .$$

Давление  $P_0$  настраивается задатчиком 3. ПИ-регулятор 2 непрерывно поддерживает равенство давлений  $P_1$  и  $P_2$ , поступающих на его вход. Соотношение между регулирующими технологическими параметрами определяется из условия  $P_1 = P_2$ . Тогда можно записать

$$\frac{P_{п1} - 0,02}{P_{п2} - 0,02} = \frac{K_1}{K_2} = C ,$$

где  $C$  – коэффициент пропорциональности.

Рассмотрим регулирование соотношения двух потоков, массовые расходы которых  $G_1$  и  $G_2$  измеряются методом переменного перепада давлений на сужающем устройстве.

Требуется поддержать соотношения между расходами  $G_1$  и  $G_2$  равными по заданному значению  $m$ , т.е.  $G_1 = mG_2$ .

$$G_1 = C_1 \sqrt{\Delta p_1} ; \quad G_2 = C_2 \sqrt{\Delta p_2} ,$$

где  $C_1, C_2$  – коэффициенты, постоянные для данного сужающего устройства и потока;  $\Delta p_1, \Delta p_2$  – перепады давления на сужающих устройствах.

Выходные сигналы  $P_{п1}$  и  $P_{п2}$  датчиков (расходомеров-дифманометров), измеряющих перепады давлений на сужающих устройствах, связаны с перепадами давлений  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_2$  :

$$\Delta p_1 = [(P_{п1} - 0,02) / 0,08] \Delta p_{1В} ;$$

$$\Delta p_2 = [(P_{п2} - 0,02) / 0,08] \Delta p_{2В} ,$$

где  $\Delta p_{1В}, \Delta p_{2В}$  – верхние пределы измерения дифманометров по перепаду давления.

Подставим эти выражения в формулы для массовых расходов:

$$G_1 = C_1 \sqrt{\Delta p_1} \sqrt{\frac{P_{п1} - 0,02}{0,08}} = G_{1В} \sqrt{\frac{P_{п1} - 0,02}{0,08}} ;$$

$$G_2 = C_2 \sqrt{\Delta p_2} \sqrt{\frac{P_{п2} - 0,02}{0,08}} = G_{2В} \sqrt{\frac{P_{п2} - 0,02}{0,08}} ,$$

где  $G_1, G_2$  – максимальные значения шкал расходомеров.

$$\text{Тогда } \frac{G_1}{G_2} = m = \frac{G_{1В}}{G_{2В}} \sqrt{\frac{P_{п1} - 0,02}{P_{п2} - 0,02}} ,$$

$$C = m^2 \left( \frac{G_{2В}}{G_{1В}} \right)^2 .$$

Найденное значение коэффициента  $C$  настраивается путем изменения проводимостей дросселей  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$ . Дроссели  $\alpha_1$  и  $\alpha_3$  выполняются постоянными. Если шкалы датчиков линейны, то величина  $C$  определяется из выражения

$$C = m \Pi_{2В} / \Pi_{1В} ,$$

где  $\Pi_{1В}, \Pi_{2В}$  – максимальные значения шкал датчиков технологических параметров.

### Вопросы для самостоятельной работы студентов

1. К приборам какой системы относится регулятор ПР 1.5-М1?
2. Для чего предназначен регулятор ПР 1.5-М1?
3. Каков закон регулирования реализует регулятор ПР 1.5-М1?
4. Назовите состав регулятора ПР 1.5-М1.
5. Поясните назначение и принцип действия каждого элемента в регуляторах ПР 1.5-М1 и ПР 2.8-М1.
6. Поясните принцип действия регулятора ПР 2.8-М1.
7. С какой целью в регуляторе ПР 2.8-М1 используют два настроечных элемента?
8. Какова процедура установки соответствующих значений диапазона дросселирования в регуляторе ПР 2.8-М1?
9. Из каких элементов состоит регулятор ПР 3.31-М1?
10. Какой закон реализуется с помощью регулятора ПР 3.31-М1?
11. Каким образом достигается линейность статической характеристики регулятора ПР 3.31-М1?
12. Сколько органов настройки имеет регулятор ПР 3.31-М1?
13. Какие необходимы измерительные приборы для снятия статической характеристики задатчика давления (рис. 8.2)?
14. Если убрать дроссель II, то чему будет равно выходное давление регулятора (рис. 8.2)?

15. В каких случаях целесообразно использовать настройку регулятора на максимум (рис.8.2)?
16. В каких случаях целесообразно использовать настройку регулятора на минимум (рис.8.2)?
17. Какие необходимы измерительные приборы для снятия статической характеристики усилителя мощности (рис. 8.2)?
18. Имеется ли обратная связь в регуляторе (рис. 8.2)?
19. Если перемещать рукоятку задатчика I вправо (пружина в большей степени воздействует на шарик), то как будет изменяться давление на выходе задатчика (рис. 8.2)?
20. Что является входом и выходом задатчика давления и усилителя мощности (рис. 8.2)?
21. Какое устройство создает давление  $P_{п}$ , поступающее на вход регулятора (рис. 8.2)?
22. С какой целью используется отключающее реле (рис. 8.3)?
23. Какое устройство создает командный сигнал  $P_{к}$  (рис. 8.3)?
24. К какому устройству подключается выходной сигнал  $P_{вых}$  регулятора (рис. 8.3)?
25. Имеется ли обратная связь в регуляторе (рис. 8.3)? Если имеется, то какого типа (положительная или отрицательная)?
26. Какое значение давления  $P_0$  следует выставлять в начальный момент (рис. 8.3)?
27. В каких камерах элемента сравнения увеличение давления может привести к увеличению давления на выходе регулятора (рис. 8.3)?
28. В каких камерах элемента сравнения увеличение давления может привести к уменьшению давления на выходе регулятора (рис. 8.3)?
29. В каком случае целесообразно использовать прямое регулирование (рис. 8.3)?
30. В каком случае целесообразно использовать обратное регулирование (рис. 8.3)?
31. Если давление  $P_{п}$  поступает в камеру Д, то какое регулирование (прямое или обратное) реализует регулятор (рис. 8.3)?
32. Сколько дроссельных сумматоров имеется в схеме регулятора (рис. 8.3)?
33. Чему будет равен выходной сигнал регулятора, если снять дроссель  $\gamma_2$  (рис. 8.3)?
34. Имеется ли обратная связь в усилителе мощности (рис. 8.3)?
35. Почему сопло в камере Е элемента сравнения заглушено (рис. 8.3)?
36. Почему регулятор ПР 2.8-М1 называется пропорциональным регулятором (рис. 8.3)?
37. Какие основные устройства входят в состав системы автоматического регулирования?
38. Как формируется выходной сигнал в элементе сравнения (рис. 8.3)?
39. Каково назначение выключающих реле 5 и 6 (рис. 8.4)?
40. Почему регулятор ПР 3.31-М1 называется пропорционально-интегральным регулятором (рис. 8.4)?
41. Какую роль выполняет повторитель 3 (рис. 8.4)?
42. С какой целью емкость 8 соединяется с выходным штуцером регулятора при  $P_{к} = 1$  (рис. 8.4)?
43. Какую функцию выполняет постоянный дроссель на входе в камеру Д пятимембранного элемента I (рис. 8.4)?
44. В какой камере трехмембранного элемента сравнения 2 увеличения давления может привести к увеличению (уменьшению) давления на выходе этого элемента (рис. 8.4)?
45. На каких элементах построена пропорциональная часть регулятора (рис. 8.4)?
46. На каких элементах построена интегральная часть регулятора (рис. 8.4)?
47. Как реализована положительная обратная связь в регуляторе (рис. 8.4)?
48. Как реализована отрицательная обратная связь в регуляторе (рис. 8.4)?
49. Как на структурной схеме регулятора (рис. 8.5) изображены пятимембранный элемент сравнения I, трехмембранный элемент сравнения 2, повторитель 3, усилитель мощности 4, дроссельные сумматоры 9 и 10 (рис. 8.4)?
50. Какие точки на структурной схеме регулятора (рис. 8.5) соответствуют следующим точкам на принципиальной схеме регулятора (рис. 8.4) камеры Д, Г, В, Б элемента I, камеры В и Б элемента 2, точка  $P_{п}$ , выходы дроссельных сумматоров 9 и 10, вход усилителя мощности 4, выход повторителя 3?
51. Как в регуляторе (рис. 8.4) осуществляется изменение постоянной интегрирования?
52. Как в регуляторе (рис. 8.4) осуществляется изменение коэффициента пропорциональности?

## 9. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ

Одними из основных технических средств автоматизации являются средства получения информации об управляемом объекте. Рассмотренные ранее пневматические элементы и узлы используют в системах автоматического контроля и управления. Целью настоящего раздела является изучение реальных устройств, реализующих пневматические методы контроля различных технологических параметров, блоки управления в которых выполнены с использованием элементов и узлов пневмоавтоматики.

При разработке систем автоматического контроля и управления технологическими процессами в химической, нефтяной, нефтехимической, лакокрасочной и ряде других отраслей промышленности необходимо применение приборов контроля состава и свойств, используемых и производимых веществ. До настоящего времени проблема создания средств контроля веществ является актуальной.

Прибор для контроля физико-механических свойств веществ в производственных условиях должен обладать следующими основными свойствами:

- работоспособностью в широком диапазоне изменения температур и давлений;
- легкостью чистки;
- коррозионной и эрозионной устойчивостью;
- точностью и воспроизводимостью показаний;
- совместимостью с существующей измерительной аппаратурой;
- высокой надежностью работы в пожаро- и взрывоопасных условиях;
- легкостью установки на существующем технологическом оборудовании;
- выходным сигналом, зависящим только от величины контролируемого параметра;
- высокой степенью унификации и стандартизации деталей, узлов и блоков;
- простотой конструкции и малой трудоемкостью ее изготовления;
- удобством в эксплуатации и ремонте.

Ни один из существующих как электрических, так и пневматических приборов не удовлетворяет всем перечисленным требованиям, однако пневматические приборы более полно отвечают этим требованиям.

Во многих технологических процессах скорость изменения параметров незначительна, поэтому такие процессы целесообразно автоматизировать средствами пневмоавтоматики. Кроме того, первичные измерительные преобразователи часто устанавливают в непосредственной близости от объекта управления, которые часто бывают пожаро- и взрывоопасны. Поэтому использование в таких условиях пневматических первичных измерительных преобразователей состава и свойств веществ делают систему автоматического контроля и управления более надежной, простой и позволяет отказаться от конструирования датчиков и линий связи в дорогостоящем взрывозащищенном исполнении.

В настоящее время разработано большое количество пневматических методов измерения физико-механических свойств жидких и газообразных и сыпучих веществ (сырья и продуктов) [1, 2], что позволило значительно увеличить количество информации об объектах, получаемых с помощью пневматических средств.

Рассмотренные выше элементы и узлы пневмоавтоматики широко используются при конструировании устройств контроля физико-механических свойств веществ (вязкости газа и жидкости, скорости и количества выделяющихся газов, плотности жидкости и сыпучего вещества) [9–11].

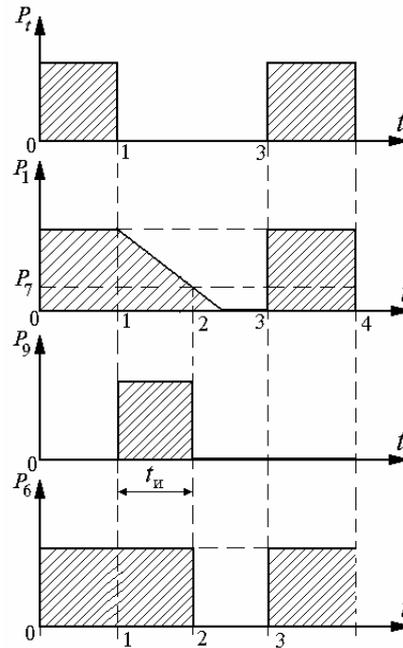
### 9.1. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ГАЗОВ

При измерении вязкости газов и жидкостей наиболее широко используют один из классических методов – капиллярный или метод истечения, в основу которого положено уравнение Пуазейля. Согласно этому методу, через ламинарное сопротивление пропускают контролируемое вещество и о его вязкости судят:

- по перепаду давления  $\Delta P$  на сопротивлении при постоянном расходе вещества через него;
- по величине расхода вещества через ламинарное сопротивление при постоянном перепаде давления  $\Delta P$  на нем;



При  $P_t = 1$ ,  $P_5 = P_1$  и  $P_4 = 1$ , при этом сопло С пневматического трехмембранного реле  $\delta$  закрыто и на выходе реле  $\delta$  давление  $P_6 = 0$ .



**Рис. 9.2. Временная диаграмма работы пневматического устройства для измерения вязкости газа**

В камеру  $A_9$  триггера с отдельными входами  $9$  поступает давление  $P_8 = 0$ , а в камеру  $B_9$  поступает давление с выхода инвертора  $10$ , равное  $P_{10} = 1$ . При таких входных давлениях триггер  $9$  занимает положение с нулевым выходным сигналом  $P_9 = 0$ . При поступлении сигнала  $P_9 = 0$  в камеру  $\Gamma_1$  пульсирующего сопротивления, мембранный блок под действием подпора, поданного в камеру  $D_1$ , перемещается вниз, соединяя камеры  $B_1$  и  $E_1$  через открытое сопло  $C_2$  пульсирующего сопротивления  $1$  с камерой  $B_1$ . Камеры  $B_1$  и  $E_1$  при этом соединены, например с трубопроводом или другим источником анализируемого газа.

Процесс измерения начинается от входной линии, а следовательно, и давление в камере  $b$  сохраняется неизменным до тех пор, пока не сменится команда. На выходе элемента  $b$  сравнения давление  $P_6 = 1$ , которое через открытое сопло  $C_1$  пневмореле  $10$  поступает в камеру  $A_9$  триггера с отдельными входами  $9$ , при этом на другой вход триггера поступает сигнал нулевого уровня. При таких входных сигналах триггер  $9$  переходит в положение с единичным выходным сигналом  $P_9 = 1$ . Под действием давления  $P_9 = 1$ , поступающего в камеру  $\Gamma_1$  пульсирующего сопротивления  $1$ , сопло  $C_1$  пульсирующего сопротивления  $1$  закрывается, а сопло  $C_2$  открывается. Анализируемый газ из дозирующей емкости  $3$  поступает через открытое сопло  $C_2$  пульсирующего пневматического сопротивления  $1$  в камеру  $B_2$  точного повторителя  $2$  со сдвигом. Камеры  $A_2$  и  $B_2$  точного повторителя  $2$  со сдвигом соединены между собой капиллярной трубкой  $4$  истечения, выполненной в виде ламинарного дросселя.

Состояние газа в дозирующей емкости  $3$  описывается уравнением

$$P_3 V = MRT, \quad (9.1)$$

где  $P_3$  – давление газа в емкости  $3$ , имеющей объем  $V$ .

При истечении газа из дозирующей емкости  $3$  давление  $P_3$  уменьшается. Истечение продолжается до тех пор, пока разность давлений  $\Delta P = P_5 - P_1$ , не станет равной давлению задания  $P_7$ , устанавливаемому задатчиком  $7$ . Таким образом, истечение газа начинается с момента, когда  $\Delta P = P_5 - P_1 = 0$ , и прекращается когда  $\Delta P = P_5 - P_1 = P_7$ .

В конце процесса истечения состояние газа описывается уравнением

$$(P_1 - P_7)V = (M - Gt_{\text{и}}) RT, \quad (9.2)$$

где  $G$  – расход газа по трубке истечения;  $t_{\text{и}}$  – время истечения.

Вычитая из (9.1) уравнение (9.2) получаем,

$$P_7 V = GRTt_{и}, \quad (9.3)$$

откуда

$$t_{и} = (P_7 V) / (GRT). \quad (9.4)$$

Расход газа в случае его ламинарного течения по капиллярной трубке истечения можно определить из формулы Пуазейля в виде

$$G = \frac{\pi d^4 \Delta P \rho}{128 l \eta}, \quad (9.5)$$

где  $d, l$  – диаметр и длина капиллярной трубки истечения, соответственно;  $\eta$  – вязкость газа;  $\rho$  – средняя плотность газа в трубке истечения;  $\Delta P$  – перепад давления на трубке истечения.

Подставляя значение  $G$  из (9.5) в (9.4), получаем

$$\eta = \frac{\pi d^4 \Delta P \rho R T}{128 P_7 V l} t_{и}.$$

После того, как  $P_5 - P_1 = P_7$  на выходе пятимембранного элемента 6 сравнения будет сигнал  $P_6 = 1$ . Этим сигналом, прошедшим через сопло 6 реле 8 инвертированным на реле 10, триггер 9 переводится в состояние с нулевым выходным сигналом. Мембранный блок пульсирующего пневматического сопротивления 1 перемещается вниз, соединяя через открытое сопло  $C_1$  дозирующую емкость 3 с входом. Подчей командного импульса  $P_i = 1$  осуществляется подготовка регистрирующего устройства к работе.

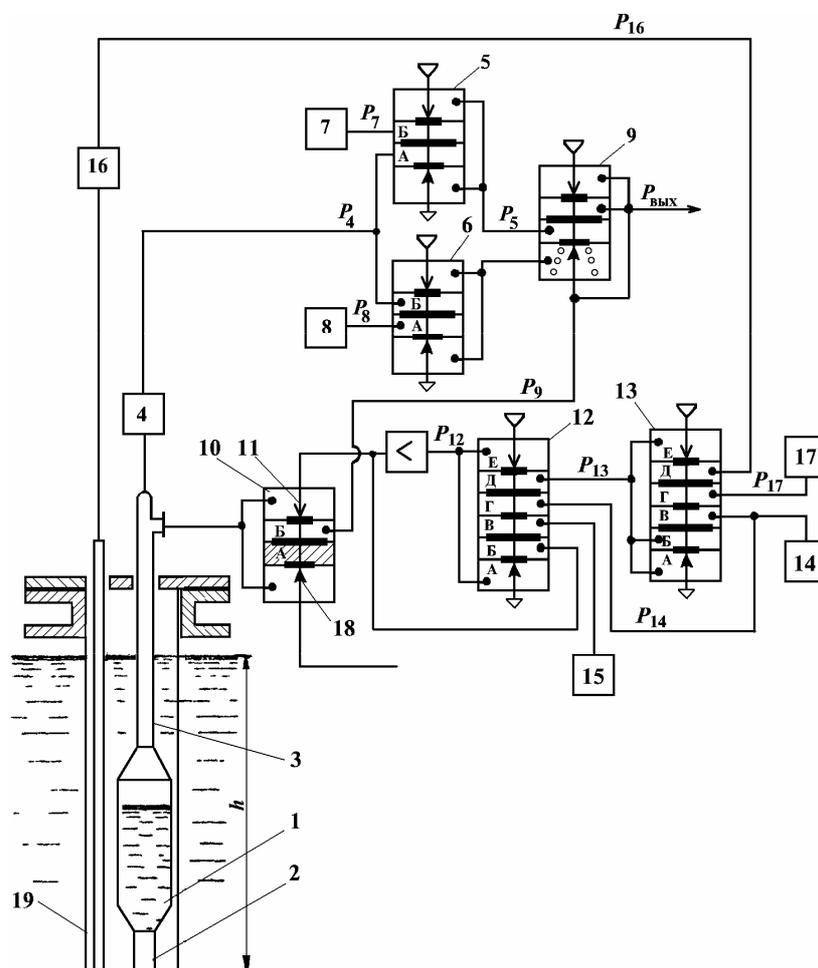
В дальнейшем работа устройства осуществляется аналогично.

Предлагаемое устройство для измерения вязкости газов обладает по сравнению с известными устройствами того же назначения рядом преимуществ. Истечение газа происходит при постоянном перепаде давления на трубке истечения, кроме того, величина перепада давления может быть легко изменена посредством настройки точного повторителя со сдвигом; результат измерения не зависит от колебаний давления во входном трубопроводе; высокая надежность работы в пожаро- и взрывоопасных условиях.

## 9.2. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

По результатам измерения вязкости жидких сред судят о качестве продукции пищевых, лакокрасочных, нефтехимических и других производств. Кроме того, по этим результатам судят о ходе технологических процессов.

Пневматическое устройство для измерения вязкости жидкости (рис. 9.3) состоит из измерительного элемента, содержащего измерительный сосуд 1 и капилляр 2, соединенного газоподводящей трубкой 3 с преобразователем 4 силы в давление, выход которого подключен в камеру А элемента 5 сравнения и в камеру Б элемента 6 сравнения. В камеру Б элемента 5 и в камеру А элемента 6 подключены соответственно задатчики 7 и 8 давлений. Выходы элементов сравнения подключены к входам триггера 9 с отдельными входами, выход которого поступает на вход вторичного прибора (на чертеже не показан) и в камеру Б реле 10, в камеру А которого подан подпор. В сопло 11 реле 10 подключен выход пятимембранного элемента сравнения 12, соединенного по схеме повторителя.



**Рис. 9.3. Устройство для контроля вязкости жидкости с блоком компенсации влияния неконтролируемых величин**

Камеры Д, Г и В элемента сравнения 12 соединены соответственно с выходом пятимембранного элемента 13 сравнения, включенного по схеме повторителя, с датчиками 14 и 15. Камеры Д, Г и В элемента сравнения 13 соединены соответственно с выходом гидростатического уровнемера 16, датчиком 17 давлений, датчиком 14 давления. В сопло 18 реле 10 подключена линия вакуума. Выход реле 10 соединен с газоподводящей трубкой 3. Измерительный элемент и чувствительный элемент уровнемера заключены в защитный кожух 19 и погружены в контролируемую жидкость, находящуюся в реакционном аппарате.

На измерительный элемент, полностью погруженный в контролируемую жидкость, действует выталкивающая сила  $F_{\text{в}}$ , равная

$$F_{\text{в}} = V_{\text{из}} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}) g,$$

где  $V_{\text{из}}$  – объем измерительного элемента;  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{г}}$  – плотность жидкости и газа, соответственно.

Сила  $F$ , действующая на чувствительный элемент преобразователя 4 силы и передаваемая при помощи газоподводящей трубки 3, равна

$$F = G - F_{\text{в}},$$

где  $G$  – вес измерительного элемента с газоподводящей трубкой.

В начальный момент жидкость в полости измерительного сосуда 1 отсутствует. На вход преобразователя 4 воздействует минимальная сила, а следовательно, на его выходе имеется минимальное давление  $P_4$ . Это давление поступает в камеру А элемента сравнения 5 и в камеру Б элемента сравнения 6. Давление  $P_7$ , устанавливаемое датчиком 7, соответствует минимальному весу измерительного элемента, а давление  $P_8$ , устанавливаемое датчиком 8, – максимальному весу.

Поступающие в соответствующие камеры элементов сравнения, давления с выхода преобразователя

в начальный момент меньше давлений, устанавливаемых датчиками 7 и 8, поэтому на выходе элемента 5 сравнения присутствует сигнал единичного уровня, а на выходе элемента 6 – нулевого. При таких входных сигналах триггер 9 имеет на своем выходе нулевой сигнал. Реле 10 под действием подпора занимает такое положение, при котором сопло 1 закрыто, а сопло 18 открыто. Через открытое сопло 18 и газоподводящую трубку 3 в полость измерительного элемента подается вакуум, величина которого постоянна.

Контролируемая жидкость под действием созданного перепада давления заполняет измерительный сосуд 1 через капилляр 2. По мере натекания жидкости в сосуд 1 увеличивается сила, действующая на преобразователь 4 и давление на его выходе. Как только давление на выходе преобразователя 4 становится больше давления в камере А элемента 6, на выходе этого элемента сравнения появляется единичный сигнал, переводящий триггер в положение, при котором на его выход поступает сигнал единичного уровня. Этот сигнал, поступая на вход реле 10, перемещает мембранный блок, закрывая сопло 18 и открывая сопло 11. В сосуд 1 поступает избыточное давление, и под его действием контролируемая жидкость начинает истекать из этого сосуда через капилляр 2.

Давление  $P_{\text{ап}}$  над поверхностью контролируемой жидкости и уровень жидкости  $h$  внутри реакционного аппарата, как правило, подвержены изменениям. Для исключения влияния этих изменений на результат измерений вязкости необходимо чтобы истечение жидкости происходило под действием постоянного перепада давлений на капилляре 2.

Постоянство перепада давления на капилляре поддерживается следующим образом.

При поступлении на входы пятимембранного элемента сравнения 13 давлений на его выходе будет давление

$$P_{13} = P_{16} + P_{14} - P_{17},$$

где  $P_{17}$  – давление, соответствующее заданному уровню жидкости;  $P_{14}$  – начальное давление;  $P_{16}$  – давление, поступающее с выхода.

При соответствии уровня в аппарате заданному значению, т.е.  $P_{16} = P_{17}$ , на выходе элемента сравнения 15 присутствует давление

$$P_{13} = P_{14}. \quad (9.6)$$

Давление  $P_{13}$  с выхода пятимембранного элемента элемента сравнения 13 поступает в камеру Д элемента сравнения 12. В камеру В элемента 12 подается давление  $P_{15}$  с выхода датчика 15, соответствующее величине избыточного давления, при котором должно проходить измерение, в камеру Г этого же элемента подается давление  $P_{14}$  с выхода датчика 14, являющееся начальным давлением или давлением смещения. Введение этого давления позволяет в зависимости от знака разности  $(P_{16} - P_{17})$  оказывать различное влияние на  $P_{12}$ . На выходе элемента сравнения 12, при поступлении на его входы перечисленных давлений, будет выходной сигнал

$$P_{12} = P_{13} - P_{14} + P_{15}. \quad (9.7)$$

С учетом формулы (9.6) уравнение (9.7) принимает вид

$$P_{12} = P_{15}.$$

Таким образом, в измерительный элемент по газоподводящей трубке поступает избыточное давление, величина которого соответствует заданному значению.

Пусть давление  $P_{\text{ап}}$  в аппарате над поверхностью жидкости и уровень  $h$  жидкости изменились. Тогда с выхода уровнемера на вход (в камеру Д) элемента сравнения 13 поступает давление

$$P_{16} = \rho_{\text{ж}}g(h \pm \Delta h) + (P_{\text{ап}} \pm \Delta P_{\text{ап}}), \quad (9.8)$$

$h$  – уровень жидкости в аппарате (заданная глубина погружения чувствительного элемента уровнемера и измерительного вискозиметра);  $\Delta h$ ,  $\Delta P_{\text{ап}}$  – изменение уровня и давления над поверхностью жидкости, соответственно.

В уравнении (9.8) величина  $\rho_{\text{ж}}gh + P_{\text{ап}} = P_{17}$ , поэтому

$$P_{16} = P_{17} \pm (\rho_{\text{ж}} g \Delta h + \Delta P_{\text{ап}}).$$

При поступлении такого давления на вход элемента 13 на его выходе имеется давление

$$P_{13} = P_{14} \pm (\rho_{\text{ж}} g \Delta h + \Delta P_{\text{ап}}). \quad (9.9)$$

Это давление поступает на вход в камеру Д элемента сравнения 12, выходное давление которого, подаваемое в измерительный элемент, равно

$$P_{12} = P_{15} \pm (\rho_{\text{ж}} g \Delta h + \Delta P_{\text{ап}}).$$

При подаче избыточного давления в полость измерительного элемента, по мере вытеснения жидкости, растет выталкивающая сила, под действием которой уменьшается сила, действующая на преобразователь 4, вследствие чего давление на выходе преобразователя уменьшается. Уменьшение давления происходит до тех пор, пока его значение не станет меньше давления, устанавливаемого задатчиком 7. При этом на выходе элемента сравнения 5 появляется сигнал единичного уровня. Под действием этого сигнала триггер 9 занимает такое положение, при котором на его выходе присутствует нулевой сигнал. Мембранный блок реле 10 под действием подпора перемещается вверх, соединяя при этом полость измерительного сосуда 1 с линией вакуума. Начинается процесс заполнения измерительного элемента жидкостью.

С выхода триггера 9 в процессе измерения поступают на вторичный прибор импульсы прямоугольной формы, длительность которых зависит от вязкости и определяется из уравнения Пуазейля в виде

$$t = \frac{128 \Delta F_{\text{в}} \eta_{\text{ж}} l}{\pi d^4 \Delta P_{\text{к}} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})},$$

где  $\Delta F_{\text{в}}$  – изменение выталкивающей силы, действующей на полностью погруженный измерительный элемент при вытеснении из него избыточным давлением  $P_{12}$  контролируемой жидкости через капилляр;  $\eta_{\text{ж}}$  – вязкость жидкости;  $\Delta P_{\text{к}}$  – перепад давления на капилляре.

Величины  $\Delta F_{\text{в}}$ ,  $l$ ,  $d$ ,  $\Delta P_{\text{к}}$ ,  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{г}}$  являются постоянными, поэтому  $t = C \eta_{\text{ж}}$ , где  $C$  – постоянная величина. В предлагаемом устройстве производится одновременно преобразование времени истечения жидкости из измерительного элемента и автоматическое дозирование жидкости, потому что объем жидкости, поступающей в измерительный сосуд и вытекающей из него, определяется давлениями, устанавливаемыми при помощи задатчиков 7 и 8.

В случае, если контролируемая жидкость взаимодействует с воздухом, в измерительный элемент через сопло питания элемента 12 сравнения необходимо подавать инертный газ, например азот.

Использование описанного выше устройства в промышленности позволяет упростить процесс измерения вязкости жидких продуктов, обладающих повышенной пожаро- и взрывоопасностью, так как оно выполнено на пневматических элементах.

Получение выходного сигнала в импульсной форме позволяет передавать результаты измерения без потери информации на расстояния, значительно превышающие допустимые для пневматических сигналов, представленных в аналоговой форме.

В случае необходимости измерять скорость истечения дозы контролируемой жидкости, рассмотренное устройство может быть снабжено регистратором, подключенным к выходу преобразователя силы в давление сжатого воздуха. При этом показания устройства не зависят от количества жидкости, остающейся на стенках измерительного сосуда, так как измерения ведут только по количеству вытекающей жидкости путем фиксации изменения веса измерительного сосуда, которое происходит под действием выталкивающей силы.

Точность устройства для измерения вязкости жидкостей при работе его в производственном аппарате выше, по сравнению с известными устройствами, вследствие того, что истечение жидкости происходит под действием постоянного перепада давления независимо от изменения уровня жидкости в аппарате и избыточного давления над поверхностью жидкости.

### 9.3. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

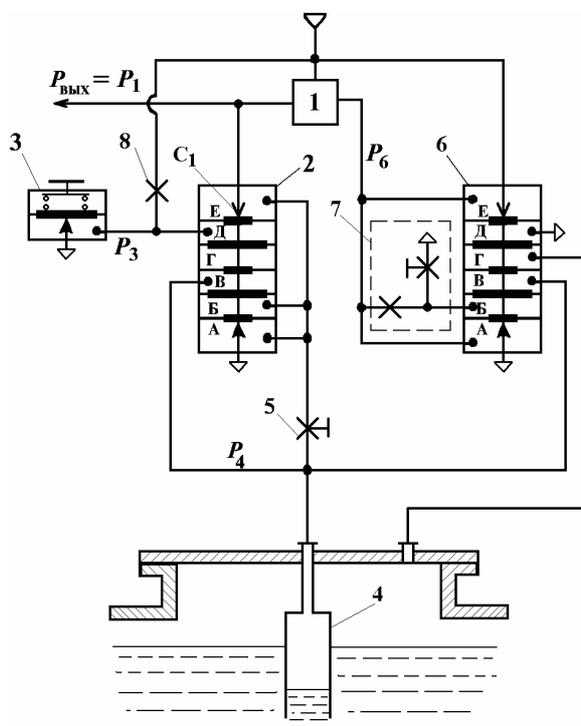
Плотность жидкости является одним из основных физико-механических свойств веществ в различных агрегатных состояниях, а также сыпучих материалов.

Плотномер (рис. 9.4) содержит релейный элемент 1, выполненный в виде двухпозиционного регулятора с настраиваемой зоной нечувствительности, выход которого соединен с регистратором (не показан) и подан на сопло  $C_1$  пятимембранного сумматора 2. В камеру  $D_2$  сумматора 2 подключен выход датчика 3. Камера  $B_2$  подключена к входу колокола, представляющего собой цилиндрическую измерительную камеру 4, а в камеру  $B_2$  подан выход пятимембранного сумматора 2, который в свою очередь соединен с входом дросселя 5, выход которого соединен с входом измерительной камеры 4, который также подключен в камеру  $B_6$  пятимембранного сумматора 6, в отрицательную обратную связь которого включен дроссельный делитель 7. Камера  $G_6$  сумматора соединена с надуровневым пространством над поверхностью контролируемой жидкости. Выход сумматора 6 подключен к входу регулятора 1.

Давление питания подано на вход позиционного регулятора 1 и сумматора 6 непосредственно, а на вход датчика 3 – через постоянный дроссель 8.

Принцип работы плотномера заключается в том, что в инерционном звене, состоящем из дросселя 5 и измерительной камеры 4, давление в камере достигает некоторого заданного значения тем быстрее, чем меньше величина емкости. Объем измерительной камеры зависит от уровня жидкости в ней, который в свою очередь зависит от плотности контролируемой жидкости.

В начальный момент времени регулятор 1 имеет на своем выходе давление  $P_1 = 1$ . Это давление подано в сопло  $C_1$  пятимембранного сумматора 2.



**Рис. 9.4. Пьезометрический плотномер с компенсацией влияния изменения давления в аппарате**

Пятимембранный сумматор 2 при помощи введения единичной отрицательной обратной связи в камеру  $B_2$  включен по схеме пневматического повторителя и имеет на своем выходе давление  $P_2$ , равное

$$P_2 = P_3 + P_4, \quad (9.10)$$

где  $P_3$  – давление, устанавливаемое датчиком 3;  $P_4$  – давление в полости измерительной камеры 4.

Массовый расход  $G$  газа через дроссель 5 выражается соотношением

$$G = \beta (P_2 - P_4), \quad (9.11)$$

где  $\beta$  – проводимость дросселя 5.

С учетом уравнения (9.10) уравнение (9.11) записывается

$$G = \beta P_3.$$

Таким образом, измерительная камера 4 заполняется газом с постоянным расходом, не зависящим от гидростатического давления внутри камеры 4 и избыточного давления в сосуде постоянного уровня. При заполнении измерительной камеры 4 сжатым воздухом жидкость вытесняется, объем камеры растет, происходит рост давления  $P_4$  за счет увеличения гидростатического давления  $P_{\Gamma} = \rho_{\text{ж}}gh$ , где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность контролируемой жидкости;  $h$  – уровень жидкости.

Давление в измерительной камере, равное  $P_4 = P_{\Gamma} + P_{\text{п}}$ , где  $P_{\text{п}}$  – давление над поверхностью контролируемой жидкости, в значительной степени зависит от давления над поверхностью контролируемой жидкости. Для исключения влияния давления  $P_{\text{п}}$  на показания плотномера полость измерительной камеры соединена с положительной камерой  $B_6$  сумматора 6, отрицательная камера  $\Gamma_6$  которого соединена с надуровневой полостью сосуда с постоянным уровнем, а отрицательная камера  $B_6$  подключена к междроссельной камере делителя 7, один вход которого соединен с атмосферой, другой – с выходом сумматора 6.

На выходе сумматора 6 при заполнении изменяется давление  $P_6$ , связанное с гидростатическим давлением соотношением

$$P_6 = k P_{\Gamma},$$

где  $k$  – коэффициент усиления.

Гидростатическое давление в измерительной камере изменяется при ее заполнении газом по уравнению

$$P_{\Gamma} = \rho_{\text{ж}}gh.$$

Заполнение прекращается после того, как давление в камере 4 достигнет значения  $P_{\text{max}}$ , которому соответствует давление на выходе сумматора 6

$$P_6 = kP_{\Gamma\text{max}} = P_{\text{max}},$$

где  $P_{\Gamma\text{max}}$  – максимальное гидростатическое давление, при котором прекращается заполнение измерительной камеры сжатым воздухом;  $P_{\text{max}}$  – давление верхнего предела срабатывания регулятора 1.

После срабатывания регулятора 1 на его выходе возникает давление  $P_1 = 0$ . Начинается процесс разгрузки камеры 4 через дроссель 5 и оба сопла сумматора 2 в атмосферу. Разгрузка заканчивается, когда

$$P_6 = kP_{\Gamma\text{min}} = P_{\text{min}},$$

где  $P_{\Gamma\text{min}}$  – минимальное гидростатическое давление, при котором прекращается разгрузка измерительной камеры;  $P_{\text{min}}$  – давление нижнего предела срабатывания регулятора 1.

После окончания разгрузки регулятор 1 срабатывает, принимая состояние с давлением на выходе  $P_1 = 1$ . Вновь начинается процесс заполнения измерительной камеры сжатым воздухом.

Таким образом, на выходе регулятора 1 возникают импульсы, частота следования которых является функцией плотности.

Схема измерительного преобразователя, кроме измерительной камеры, выполнена из элементов УСЭППА.

Повышение точности измерений при использовании плотномера достигается за счет исключения влияния давления над поверхностью контролируемой жидкости на пределы срабатывания релейного элемента.

В рассматриваемой конструкции прибора расход газа в измерительной камере не зависит от изменения давления в ней. За счет введения вместо трехмембранного реле двухпозиционного регулятора с настраиваемой зоной нечувствительности типа ПР 1.6 возможно управление уровнями жидкости в измерительном элементе.

Широко известный барботажный метод измерения плотности [2, 3], несмотря на присущую ему простоту и надежность, обладает тем недостатком, что при контроле жидкостей с повышенной вязкостью, последняя существенно загрязняется пузырьками воздуха. Уменьшить загрязнение можно путем подачи на вход уменьшенного количества газа. Конструктивно такая проблема решена в пьезометрическом импульсном плотномере (рис. 9.5), содержащем релейный элемент 1 (позиционный регулятор с настраиваемой зоной нечувствительности типа ПР 1.6), выход которого соединен через усилитель 2 мощности с вторичным прибором (не показан) и с камерой 3 пневматического пульсирующего сопротивления 4.

Вход пульсирующего сопротивления 4 соединен через постоянный дроссель 5 с выходом релейного элемента 1. Камера 6 пульсирующего сопротивления 4 соединена с пневмоемкостью 7 и с входом релейного элемента 1. Выход (камера 8) пульсирующего сопротивления 4 через переменный дроссель 9 соединен с пьезо-

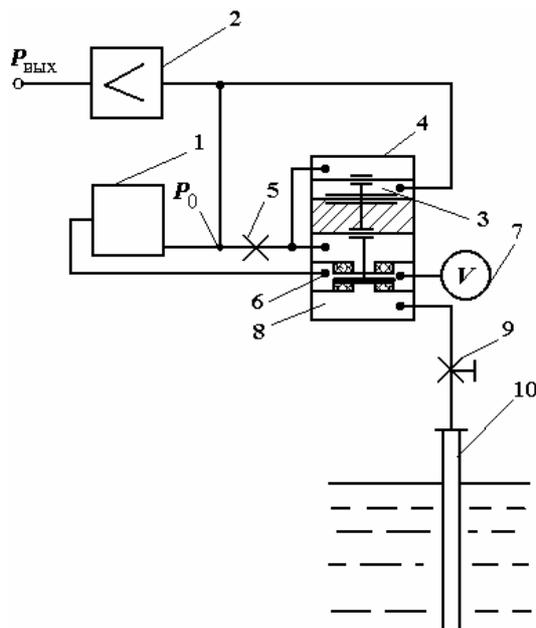


Рис. 9.5. Пьезометрический импульсный плотномер

метрической трубкой 10, погруженной в жидкость, находящуюся в проточном сосуде с постоянным уровнем (не показан). На рис. 9.6 представлена временная диаграмма работы пьезометрического импульсного плотномера.

Принцип работы пьезометрического плотномера заключается в том, что процессы заполнения и разгрузки пневматической емкости 7 осуществляются раздельно. При этом

$$\alpha_1 \neq 0, \alpha_2 = 0, \text{ если } P_0 = 1 \text{ и}$$

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 \neq 0, \text{ если } P_0 = 0,$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – проводимости постоянного 5 и переменного 9 дросселей соответственно;  $P_0$  – давление на выходе релейного элемента 1.

При соединении емкости 7 через дроссель 5 с выходом релейного элемента 1 происходит ее заполнение от давления  $P_1$  до  $P_2$ , устанавливаемых соответствующими настроечными элементами (задатчиками) в конструкции релейного элемента. Время заполнения пневматической емкости 7 от давления  $P_1$  до  $P_2$  является постоянной величиной, т.е. независимой от плотности контролируемой жидкости. После достижения давлением в пневматической емкости 7 значения  $P_2$  начинается процесс разгрузки посредством соединения пневматической емкости 7 через переменный дроссель с пьезометрической трубкой 10. Время разгрузки  $t_2$  (рис. 9.6.) пневматической емкости 7 от давления  $P_2$  до  $P_1$  зависит от гидростатического давления, т.е. при постоянном уровне – от плотности жидкости  $\rho$ .

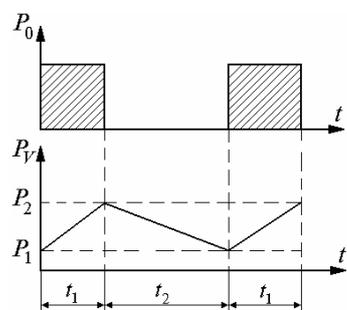


Рис. 9.6. Временная диаграмма работы пьезометрического импульсного плотномера

Пусть в начальный момент времени на выходе релейного элемента 1 будет давление  $P_0 = 1$ . Это давление поступает через усилитель 2 мощности на вход вторичного прибора, в камеру 3 управления пневматическим пульсирующим сопротивлением 4 и через постоянный дроссель 5 – на вход пульсирующего сопротивления 4. Под действием давления  $P_0 = 1$  мембранный блок пульсирующего сопротивления 4 перемещается вниз, соединяя при этом вход с камерой 6, пневматической емкостью 7 и с входом релейного элемента 1. В общем объеме, состоящем из камеры 6, пневматической емкости 7 и соединительного объема (объем соединительных трубок), давление  $P_V$  начинает расти. Время, в течение которого давление  $P_V$  в общем объеме  $V$  увеличивается от значения  $P_1$  до  $P_2$  ( $P_2$  –

верхний предел срабатывания,  $P_1$  – нижний предел срабатывания релейного элемента) при входном давлении  $P_0 = 1$ , определяется уравнением

$$t_1 = \tau \ln ((P_0 - P_1) / (P_0 - P_2)),$$

где  $\tau = V/RT\alpha_1$  – постоянная времени инерционного звена (дроссель 5, общий объем  $V$ ), где  $V$  – общий объем.

Время  $t_1$  постоянное и определяется, как видно из полученной формулы, значениями постоянной времени  $\tau$  и уровнями давлений срабатывания релейного элемента.

Как только давление в общем объеме  $V$  достигнет значения  $P_2$ , произойдет переключение релейного элемента  $I$  и на его выходе будет сигнал нулевого уровня, т.е.  $P_0 = 0$ .

Под действием подпора пульсирующее сопротивление 4 соединяет общий объем  $V$  через дроссель 9 с проводимостью  $\alpha_2$  с пьезометрической трубкой 10.

После переключения пульсирующего сопротивления начинается разгрузка емкости  $V$  от давления  $P_2$  до  $P_1$  при сообщении с измерительной трубкой, давление в которой равно гидростатическому

$$P_r = \rho_{ж} g h .$$

Время разгрузки  $t_2$  (рис. 9.6) общего объема  $V$  определяется формулой

$$t_2 = \tau_1 \ln ((P_2 - P_r) / (P_1 - P_r)),$$

где  $\tau_1 = V_1 / (RT\alpha_2)$  – постоянная времени;  $V_1 = V + V_2$  – объем глухой пневматической камеры;  $V_2$  – объем камеры  $\delta$ .

После достижения давлением в общем объеме значения  $P_1$  произойдет обратное переключение релейного элемента  $I$ , при котором на его выходе вновь появится сигнал единичного уровня, т.е.  $P_0 = 1$ . Вновь начинается процесс заполнения общего объема сжатым воздухом, который происходит аналогично рассмотренному выше.

На выходе предложенного пьезометрического плотномера будет последовательность прямоугольных импульсов, частота следования которых является функцией плотности контролируемой жидкости.

Применение в схеме предлагаемого плотномера пульсирующего пневматического сопротивления позволяет исключить влияние соотношения проводимостей постоянного и переменного сопротивлений на результат измерений, что повышает точность и надежность измерений. Введение в конструкцию релейного элемента в виде двухпозиционного регулятора с настраиваемой зоной нечувствительности дает возможность независимой настройки давлений срабатывания, что позволяет воздействовать на частоту выходного сигнала.

#### 9.4. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И КОЛИЧЕСТВА ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ ГАЗОВ

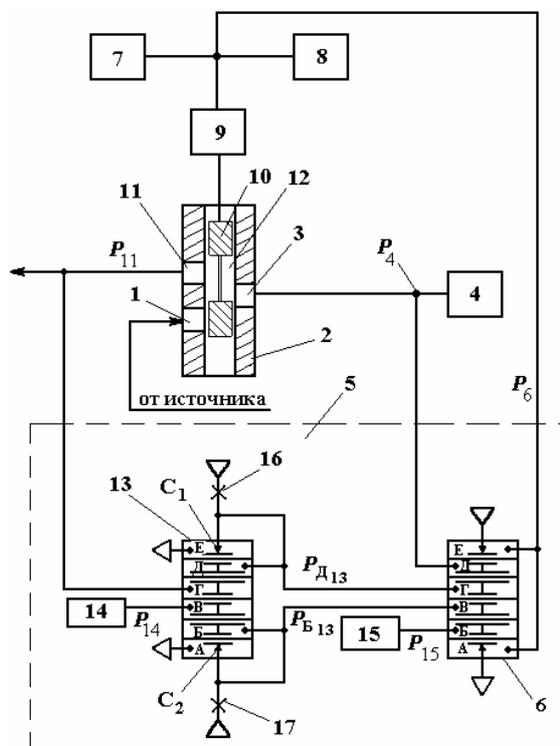
При контроле плотности в условиях пищевых производств, необходимо вводить коррекцию на газосодержание исследуемой жидкости. В противном случае показания измерительного прибора будут соответствовать не плотности жидкости, а кажущейся плотности смеси жидкость-газ. Такая ситуация характерна для сахарных, крахмалопаточных, спиртовых и хлебопекарных заводов при измерении плотности или концентрации диффузионного сока, известкового молока, сатурационного сока, сахарного сиропа, крахмального молока, паточного сиропа, бродящей массы, раствора поваренной соли и др.

Имеется ряд химических и биохимических реакций при осуществлении которых происходит выделение веществ в виде газа. Измеряя выделившееся количество газа и, используя стехиометрическое соотношение реакции, определяют реальное состояние процесса, а затем формируют управление процессом.

При контроле газопроницаемости пористых материалов и герметичности изделия необходимо определять количество газа, прошедшего через пористый материал и неплотности изделия.

Таким образом, измерение скорости и количества выделяющихся газов от маломощного источника дает дополнительную информацию об исследуемом объекте и является актуальной задачей аналитического контроля, так как по измеренным параметрам выделяющихся газов можно оценить газосодержание жидкости, определить реальное состояние ряда химических и биохимических реакций, оценить газопроницаемость пористых материалов и герметичность изделий.

Пневматическое устройство для измерения скорости и количества выделяющихся газов (рис. 9.7) [11] включает канал 1 золотникового элемента 2, к которому присоединен источник газовой выделений (на рисунке не показан). К каналу 3 подключена измерительная камера 4 и преобразователь 5 давления, выходной элемент 6 которого присоединен к частотомеру 7 и счетчику 8 импульсов, а также соединен с входом исполнительного механизма 9 золотникового элемента. Исполнительный механизм 9 механически связан с золотником 10. Канал 11 элемента 2 соединен с атмосферой или со сборной емкостью, а канал 12 золотника 10 связывает между собой каналы 1 и 3 или каналы 11 и 3.



**Рис. 9.7. Устройство для измерения скорости и количества выделяющихся газов**

Преобразователь 5 давления выполнен в виде двух пятимембранных пневматических элементов 6 и 13 сравнения, двух задатчиков 14 и 15 давления и двух постоянных дросселей 16 и 17. Сопла  $C_1$  и  $C_2$ , расположенные соответственно в камерах  $A_{13}$  и  $E_{13}$  пятимембранного элемента 13 сравнения, через постоянные дроссели 16 и 17 соединены с источником давления.

Междроссельная камера, образованная соплом  $C_1$  и дросселем 16, соединена с камерой  $D_{13}$ , а камера, образованная соплом  $C_2$  и дросселем 17, соединена с камерой  $B_{13}$  отрицательной обратной связи.

Устройство для определения скорости и количества выделяющихся газов работает следующим образом.

При отсутствии газовой выделений золотниковый элемент 2 занимает положение, при котором канал 1 через канал 12 в золотнике 10 соединен с каналом 3. В измерительной камере 4 давление равно  $P_4$ , установленное задатчиком 14. На выходе преобразователя 5 давления при этом будет сигнал нулевого уровня, так как  $P_4 < P_{15}$ , устанавливаемый задатчиком 15. Этот сигнал воздействует на исполнительный механизм 9, удерживающий золотник 10 в положении, при котором соединяются каналы 1 и 3.

Газы от источника газовой выделений поступают через канал 1 в камеру 4, вызывая рост давления в ней. Как только давление в камере 4 достигает значения  $P_{15}$ , на выходе элемента 6 сравнения появляется единичный сигнал. Этот сигнал поступает на вход исполнительного механизма 9, который при этом перемещает золотник 10, соединяя канал 11 с каналом 3. Происходит разгрузка камеры 4 в атмосферу или в сборную емкость. Разгрузка камеры 4 до давления  $P_{11}$  происходит за время значительно меньшее, чем время ее наполнения.

На выходе преобразователя 5 после разгрузки камеры 4 появляется нулевой сигнал  $P_6 = 0$ , под действием которого исполнительный механизм 9 перемещает золотник 10 так, чтобы канал 12 соединил каналы 1 и 3.

Вновь начинается процесс заполнения камеры 4 выделяющимися газами. Количество газа  $M_0$ , которое выводится за один цикл из камеры 4, определяется по формуле

$$M_0 = (P_{15} - P_{11})V / (RT), \quad (9.12)$$

где  $P_{15}$  – величина давления, устанавливаемая задатчиком 15;  $P_{11}$  – величина давления в канале;  $V$  – емкость камеры 4.

Если давление  $P_{11}$  в канале 11 (атмосфера или сборная емкость) постоянно и равно давлению настройки задатчика 14, т.е.  $P_{11} = P_{14}$ , то первая часть формулы (9.12) постоянна, поэтому количество газа, которое выводится за один цикл из камеры 4, будет постоянно и равно расчетному.

На выходах элемента 13 при  $P_{11} = P_{14}$  давление будет равно нулю. Элемент 6 сравнения при этом будет иметь выходное давление

$$P_6 = \begin{cases} 1, & \text{если } P_4 > P_{15}; \\ 0, & \text{если } P_4 < P_{15}. \end{cases}$$

Процессы заполнения и разгрузки измерительной камеры 4 чередуются. О скорости газовыделений  $W$  в устройстве судят по частоте  $f$  переключения элемента 6, которая измеряется частотомером 7 и связана со скоростью газовыделений зависимостью

$$W = \frac{(P_{15} - P_{11})Vf}{RT}. \quad (9.13)$$

Количество выделившихся газов определяется количеством импульсов  $N$ , поступивших на счетчик 8, которое связано с количеством выделившихся газов  $M$  соотношением вида

$$M = \frac{(P_{15} - P_{11})VN}{RT}.$$

Информация об измеряемых параметрах на выходе устройства представляется в виде последовательности прямоугольных импульсов, частота которых пропорциональна скорости газовыделений, а количество импульсов пропорционально количеству выделившегося газа.

При изменении величины давления в линии сброса  $P_{11}$  изменяется величина  $M_0$ , поэтому появляется ошибка в определении общего количества выделившегося газа.

Пусть давление в линии сброса  $P_{11}$  возрастает на некоторую величину  $\Delta P$ , т.е.  $P_{11} - P_{14} = \Delta P$ . Для того, чтобы величина  $M_0$  осталась прежней, происходит срабатывание элемента 6 и соединение каналов 11 и 3 так, чтобы разность  $P_{15} - P_{11}$  осталась прежней.

Рассмотрим подробнее работу преобразователя 5 давления.

Работа элементов 6 и 13 основана на принципе пневматической силовой компенсации, при котором механические перемещения близки к нулю. В элементе 13 происходит сравнение давлений  $P_{11}$  с давлением  $P_{14}$ , которые поступают в измерительные камеры  $\Gamma_{13}$  и  $V_{13}$ . Под действием разности этих давлений перемещается мембранный блок, состоящий из пяти резинотканевых мембран, соединенных между собой жестким центром, торцы которых служат заслонками сопел  $C_1$  и  $C_2$ .

При  $P_{11} - P_{14} = \Delta P$  для элемента 13 имеем

$$P_{B13} = 0, \quad P_{D13} = P_{11} - P_{14} = \Delta P.$$

Для элемента 6:

$$P_6 = \begin{cases} 1, & \text{если } P_4 > P_{15} + \Delta P; \\ 0, & \text{если } P_4 < P_{15} + \Delta P. \end{cases}$$

Поэтому при возрастании давления  $P_{11}$  на величину  $\Delta P$  давление, при котором происходит переключение золотника 10 на сброс давления из камеры 4, увеличивается на величину  $\Delta P$ , т.е. разность давлений в формуле (9.12) остается прежней.

Рассмотрим второй случай, когда давление  $P_{11}$  уменьшается на величину  $\Delta P$ , т.е.  $P_{14} - P_{11} = \Delta P$ .

Тогда для элемента 13 можно записать

$$P_{Б13} = P_{14} - P_{11} = \Delta P, \quad P_{Д13} = 0.$$

Для элемента 6 имеем:

$$P_6 = \begin{cases} 1, & \text{если } P_4 > P_{15} - \Delta P, \\ 0, & \text{если } P_4 < P_{15} - \Delta P. \end{cases}$$

Поэтому при уменьшении давления  $P_{11}$  на величину  $\Delta P$  давление, при котором происходит переключение золотника 10 на сброс давления из камеры 4, уменьшается на величину  $\Delta P$ , т.е. разность давлений в формуле (9.12) остается прежней.

Рассмотренное устройство увеличивает точность определения скорости и количества выделяющихся газов, так как учитываются колебания давления на линии сброса газа, поэтому за каждый цикл в линию сброса поступает заданное постоянное количество газа. Кроме того, для пневматических элементов используются в качестве входных давлений давления измеряемой газовой среды без дополнительного преобразования.

### 9.5. Устройство для измерения плотности сыпучих материалов

Одной из характеристик, широко используемых для оценки качества продукции и сырья в виде сыпучих материалов (СМ) является плотность  $\rho$ . Все методы измерения плотности являются абсолютными или косвенными. Абсолютные методы, путем прямых измерений объема и массы, наиболее предпочтительны для практического определения плотности сыпучих веществ и твердых тел сложной формы. Косвенные методы, основанные, например, на затухании радиоактивных, рентгеновских или ультразвуковых потоков, проходящих через анализируемое вещество (тело), более удобны для автоматизации, однако их показания существенно зависят от толщины и формы изделий, физических и химических свойств вещества. Поэтому косвенные методы получили большее распространение для жидких и газообразных сред, которые легко занимают заданный объем в измерительной емкости. Измерение плотности сыпучих материалов, различных изделий сложной формы из твердых материалов не является однозначным и создает ряд дополнительных трудностей.

Сыпучим материалам присущи насыпная и истинная или пикнометрическая плотности, знание которых необходимо при проектировании различного оборудования, при расчетах сыпучести и веса хранящегося продукта и др.

Насыпная плотность представляет собой массу материала в единице занимаемого им объема. Она зависит от размера и материала частиц сыпучего материала, влажности, плотности укладки частиц. Пикнометрическая или средняя плотность материала определяется как отношение массы вещества к его объему. Измерение объемов пористых и сыпучих веществ, не допускающих смачивания в какой-либо жидкости, является сложной экспериментальной задачей, поскольку обычные методы измерений объемов – метод гидростатического взвешивания и пикнометрический – неприменимы. В связи с этим для определения объемов сыпучих материалов применяют методы, основанные на законе Бойля-Мариотта, при реализации которых используют камеры с известным объемом для сжатия воздуха и различные устройства для измерения давления воздуха в них. При изотермическом процессе изменения объема газа выражение для определения плотности будет иметь вид [12]

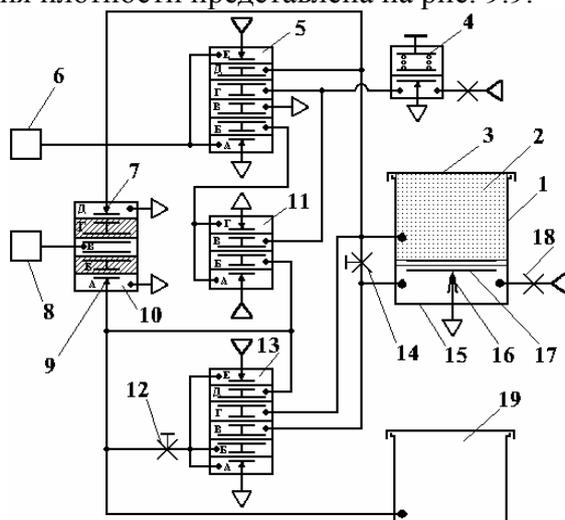
$$\rho = \frac{mP_2}{V(P_2 - P_1)},$$

где  $P_1, P_2$  – абсолютное давление газа в измерительной емкости до и после помещения в нее контролируемого материала.

Из уравнения видно, что для определения плотности необходимо предварительное измерение объема  $V$ , после чего находится масса  $m$ , по которым судят о плотности.

При реализации различных методов измерения плотности часто наиболее предпочтительным является использование времени как информативного параметра, так как этот параметр может быть измерен, зафиксирован и преобразован простыми техническими средствами с более высокой точностью, чем сигналы другой природы, например давление или расход.

Принципиальная пневматическая схема автоматического устройства, реализующего пневмодинамический метод измерения плотности частиц сыпучих материалов, выполнена с использованием пневматических дроссельных и мембранных элементов [6, 7, 9] и изображена на рис. 9.8. Временная диаграмма работы устройства для измерения плотности представлена на рис. 9.9.



**Рис. 9.8. Пневматическая принципиальная схема устройства для измерения плотности частиц СМ**

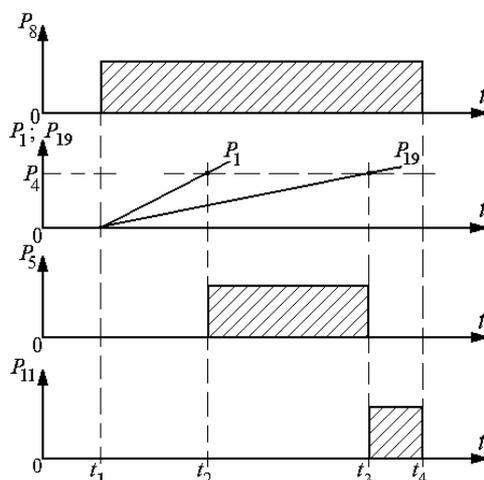
Измерительная емкость  $1$  заполнена контролируемым веществом  $2$ , герметично закрыта крышкой  $3$  и соединена с камерами  $\Gamma_{13}$  и  $D_5$  пятимембранных элементов сравнения  $13$  и  $5$ , а также через дроссель  $14$  с камерой  $B_{13}$  элемента сравнения  $13$  и с камерой  $15$ . Камера  $15$  отделена от измерительной емкости  $1$  мембраной  $17$ . В ней размещено сопло  $16$ , соединенное с атмосферой. Сопло  $16$  и мембрана  $17$  образуют управляемый дроссель типа "сопло-заслонка". В камеру  $15$  через постоянный пневматический дроссель  $18$  подано давление питания.

Выход пятимембранного элемента  $13$  подключен к камере  $B_{13}$  и через дроссель  $12$  к компенсационной емкости  $19$ , которая подключена к камере  $D_{13}$  и к камере  $B_{11}$  трехмембранного элемента сравнения  $11$ .

В камеру  $B_{11}$  и в камеру  $\Gamma_5$  включен выход датчика давления  $4$ . Выход трехмембранного элемента сравнения  $11$  соединен с камерой  $B_5$ . Выход пятимембранного элемента сравнения  $5$  подключен к входу измерителя длительности  $6$ .

Измерительная емкость  $1$  подключена в сопло  $7$  пневматического клапана  $10$ , в сопло  $9$  которого подключена компенсационная емкость  $19$ . Сопловые камеры  $A_{10}$  и  $D_{10}$  соединены с атмосферой. В камеры  $B_{10}$  и  $\Gamma_{10}$  подано давление подпора, а камера  $B_{10}$  подключена к выходу генератора прямоугольных импульсов управления  $8$ .

Контролируемое вещество помещают в измерительную емкость  $1$ , которую после этого герметично закрывают крышкой  $3$ .



**Рис. 9.9. Временная диаграмма работы устройства для контроля плотности сыпучих материалов**

Процесс измерения начинается в момент поступления (момент времени  $t_1$  на рис. 9.9) в камеру В<sub>10</sub> сигнала  $P_8 = 1$  с выхода источника импульсов управления  $\delta$ . При этом сопла 7 и 9 прикрываются и емкости 1 и 19 изолируются от атмосферы. При  $P_8 = 0$  (момент времени  $t_4$  на рис. 9.9) происходит соединение емкостей 1 и 19 с атмосферой и подготовка их к очередному циклу измерения.

На мембрану 17 со стороны измерительной емкости 1 действует сила  $F_m = mg$ , где  $m$  – масса сыпучего вещества или тела неправильной формы;  $g$  – ускорение свободного падения, а также сила  $F_{P_1} = P_1 S$  от давления  $P_1$  в емкости 1 на поверхность мембраны 17 с площадью  $S$ . Действие силы  $F_1 = F_m + F_{P_1}$  уравновешивается силой  $F_2 = P_{13} S$  от давления  $P_{13}$  в камере 15, т.е.  $F_1 = F_2$ .

Под действием силы  $F_1$  мембрана перемещается вниз. Расстояние между соплом и заслонкой уменьшается, что приводит к росту давления в междроссельной камере.

При поступлении давления  $P_{15}$  на вход дросселя 14 с проводимостью  $\alpha_{14}$  начинается процесс заполнения сжатым газом емкости 1 с контролируемым веществом 2, сопровождающийся ростом давления  $P_1$ . Массовый расход газа через линейный дроссель 14 остается постоянным и равным  $G_{14} = \alpha_{14} (P_{15} - P_1)$ , так как

$$P_{15} - P_1 = \frac{mg}{S}.$$

Давление из емкости 1 поступает на вход в камеру Д<sub>5</sub> пятимембранного элемента сравнения 5, осуществляющего сравнение давления  $P_1$  и давления  $P_4$ , поступающего в камеру Г<sub>5</sub> с выхода задатчика 4. До тех пор, пока  $P_1 < P_4$ , давление на выходе элемента сравнения 5  $P_5 = 0$ .

Давления  $P_{15}$  и  $P_1$ , определяющие перепад на дросселе 14, поступают соответственно в камеры Г<sub>13</sub> и В<sub>13</sub> пятимембранного элемента сравнения 13, включенного по схеме повторителя путем подачи выходного давления  $P_{13}$  на его вход в камеру Б<sub>13</sub>. Давление на выходе элемента сравнения 13

$$P_{13} = P_{15} - P_1 + P_9 = \frac{mg}{S} + P_{19},$$

где  $P_{19}$  – давление в компенсационной емкости 19.

Расход газа  $G_{12}$ , протекающего по дросселю 12 и поступающего в компенсационную емкость 19

$$G_{12} = \alpha_{12} (P_{13} - P_{19}) = \alpha_{12} \frac{mg}{S}.$$

С момента подачи газа на вход измерительного устройства начинаются процессы заполнения емкостей 1 и 19, сопровождаемые ростом давлений в них. Процесс заполнения емкости 1 с контролируемым веществом 2 описывается линейным дифференциальным уравнением

$$\frac{(V_1 - V_B)}{RT} \frac{dP_1}{dt} = \alpha_{14} \frac{mg}{S}, \quad (9.14)$$

где  $V_1, V_B$  – объем емкости 1 и частиц сыпучего материала;  $\alpha_{14}$  – проводимость дросселя 14.

Время  $t_{12}$  (рис. 9.9), в течение которого давление  $P_1$  изменяется от атмосферного до значения  $P_4$ , определяемого настройкой задатчика 4, находится путем решения уравнения (9.14) в виде

$$t_{12} = \frac{(V_1 - V_B)}{m} \frac{SP_4}{RT\alpha_{14}g}. \quad (9.15)$$

Процесс заполнения емкости 19 с объемом  $V_{19} = V_1$  сжатым газом через дроссель 12 с проводимостью  $\alpha_{12} = \alpha_{14}$  описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{V_1}{RT} \frac{dP_{19}}{dt} = \alpha_{14} \frac{mg}{S}.$$

Время  $t_{13}$  (рис. 9.9) изменения давления  $P_{19}$  в емкости 19 от атмосферного давления до давления  $P_4$

$$t_{13} = \frac{V_1}{m} \frac{SP_4}{RT\alpha_{14}g}. \quad (9.16)$$

Как только давление  $P_1$  станет равным  $P_4$ , на выходе элемента сравнения 5 появится сигнал единичного уровня, т.е.  $P_5 = 1$  (момент времени  $t_2$  рис. 9.9). Этим давлением включается измеритель времени 6.

Давление  $P_4$  поступает в камеру  $B_{11}$  трехмембранного элемента сравнения 11, в камеру  $B_{11}$  которого поступает давление  $P_{19}$  из емкости 19. Как только давление в емкости 9 станет равным давлению  $P_4$ , на выходе элемента сравнения 11 сформируется сигнал  $P_{11} = 1$ .

При поступлении давления  $P_{11} = 1$  в камеру  $B_5$  элемента сравнения 5 на его выходе формируется сигнал  $P_5 = 0$ . Измеритель времени 6 останавливается и фиксирует длительность  $t_{23}$  отрезка времени, определяющего разность времен заполнения емкостей 1 и 19

$$t_{23} = \Delta t = t_{13} - t_{12}. \quad (9.17)$$

Время  $t_{13} > t_{12}$ , причем их разность определяет пикнометрической плотностью контролируемого вещества. После подстановки в (9.17) значений времени из (9.15) и (9.16) получим

$$\Delta t = \frac{V_B}{m} \frac{SP_4}{RT\alpha_{14}g} = \frac{A}{\rho_B} = A \nu, \quad (9.18)$$

где  $A = \frac{SP_4}{RT\alpha_{14}g} = \text{const}$  при условии постоянства температуры  $T$  и проводимости дросселя  $\alpha_{14}$ ;  $\rho_B = \frac{m}{V_B}$  – плотность частиц СМ;  $\nu$  – удельный объем частиц СМ.

Таким образом, с помощью предложенного устройства возможно получение усредненных значений кажущейся плотности частиц СМ, полученных в результате многократных измерений.

Измерение плотности разработанным устройством осуществляется в едином измерительном процессе, поэтому не требуется запоминания промежуточных результатов и осуществления специальной операции деления. О плотности контролируемого вещества судят по величине временного интервала, в течение которого давление в измерительной емкости изменится на заданную величину при заполнении ее сжатым газом.

Разработанное устройство может быть использовано для экспресс-контроля плотности СМ, в различных отраслях промышленности, таких как химическая, лакокрасочная, пищевая, строительная и др.

### Вопросы для самостоятельной работы студентов

1. В рассматриваемом устройстве для измерения вязкости газа, вязкость определяется по ...
  - а) времени истечения заданного количества газа через капилляр при постоянном перепаде давления;
  - б) объему газа, прошедшего через капилляр за определенный промежуток времени;
  - в) перепаду давления, установившемуся при движении газа через капилляр.
2. Какой элемент в схеме устройства для измерения вязкости газа позволяет настраивать перепад давления на капилляре?
  - а) задатчик давления;
  - б) точный повторитель со сдвигом;
  - в) пульсирующее сопротивление.
3. С какой целью в устройстве для измерения вязкости газа используют пульсирующее сопротивление?
  - а) для исключения короткого замыкания;
  - б) для отбора пробы газа;
  - в) а) и б).
4. Какой принцип заложен в основу работы устройства для измерения вязкости жидкостей?
  - а) принцип гидростатического взвешивания;
  - б) принцип гидростатического уравнивания;
  - в) принцип капиллярного поднятия.

5. Реле П1Р.1, используемое в схеме устройства для измерения вязкости жидкостей, предназначено для ...
- а) выполнения логической операции "отрицание";
  - б) соединения измерительного сосуда с линией вакуума;
  - в) соединения измерительного сосуда с линией избыточного давления, либо с линией вакуума.
6. Какой регулятор используется в схеме пьезометрического плотномера с компенсацией влияния изменения давления в аппарате?
- а) позиционный регулятор;
  - б) пропорциональный регулятор;
  - в) интегральный регулятор.
7. Что является функцией плотности в пьезометрическом плотномере?
- а) скорость изменения давления на выходе интегрального регулятора;
  - б) частота импульсов давления на выходе позиционного регулятора;
  - в) величина давления на выходе пропорционального регулятора.
8. Какое пульсирующее сопротивление использовано в устройстве для измерения скорости и количества выделяющихся газов?
- а) с упругими соплами;
  - б) золотникового типа;
  - в) дроссельного типа.
9. Сколько элементов сравнения используется в схеме устройства для измерения плотности частиц сыпучих материалов?
- а) один;
  - б) два;
  - в) три.
10. По какой величине судят о плотности частиц сыпучих материалов?
- а) по времени заполнения емкости с СМ до заданного давления;
  - б) по времени заполнения компенсационной емкости до заданного давления;
  - в) по разности времен заполнения компенсационной и измерительной емкостей до заданного давления.
11. С какой целью в устройстве для контроля вязкости газа использован повторитель со сдвигом?
- а) для повторения входного давления;
  - б) для формирования постоянного перепада давления на капилляре;
  - в) для смещения выходного давления.
12. Какую функцию выполняет пульсирующее пневматическое сопротивление в устройстве для измерения вязкости газа?
- а) сопротивления потоку газа;
  - б) пробоотбора контролируемого вещества;
  - в) преобразования входного давления.

## **10. ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ПНЕВМОНИКИ (СТРУЙНОЙ АВТОМАТИКИ)**

---

---

### 10.1. Основные понятия.

#### ПРЕИМУЩЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ ПНЕВМОНИКИ

Термин "пневмоника" возник по аналогии с названием "электроника", указывая тем самым на определенное сходство процессов, протекающих в струйных и электронных элементах. Те и другие элементы не имеют движущихся механических частей. Выполняемые элементами операции связаны с движением рабочей среды (электронов или частиц газа).

В основу работы элементов пневмоники положены принципы аэродинамического взаимодействия потоков газа, что открывает ее огромные потенциальные возможности.

Струйные элементы называются активными, если к ним подводится давление непосредственно от источника питания. Элементы, в которых используется энергия только входных (управляющих) сигналов, называются пассивными.

Все активные элементы, как правило, являются усилителями, так как в них с помощью слабых входных (управляющих) сигналов осуществляется управление струей питания.

Надежность струйных элементов и устройств выше, чем у других, применяемых в настоящее время элементов автоматики. Она определяется правильностью выбора геометрии элементов, качеством их изготовления и тщательностью очистки воздуха от механических примесей.

При изготовлении элементов методом прессования, например, можно достигнуть хорошей повторяемости рабочих характеристик. Особенно выгодно отличаются по надежности струйные элементы, работающие в условиях агрессивного воздействия окружающей среды. Известны случаи, когда элементы пневмоники оказывались единственно приемлемыми при построении систем автоматизации специальных назначений. Так, например, успешно эксплуатируется струйная система управления прессованием абразивных кругов. Система работает в условиях чрезвычайной загрязненности воздуха производственного помещения абразивной пылью, что резко снижает надежность электронных и электромеханических систем управления. Использование струйных элементов с увеличенными проходными сечениями функциональных каналов позволило повысить надежность таких систем.

Долговечность элементов и устройств пневмоники определяется подбором соответствующего материала. Струйные элементы могут быть изготовлены из металла или керамики, и в этом случае долговечность их становится практически неограниченной.

Отсутствие механических подвижных частей позволяет применять при изготовлении струйных элементов такие прогрессивные методы, как прессование, штамповку, литье под давлением, травление и т.д. При этом с помощью одной пресс-формы, одного штампа или одного негатива можно получать большое количество рабочих элементов. При этом наиболее трудоемкой является лишь операция по изготовлению штампа или негатива.

При изготовлении струйных элементов методом прессования себестоимость их оказывается в десятки раз меньше стоимости аналогичных по назначению электронных элементов и в сотни раз меньше стоимости элементов с подвижными механическими частями.

Еще более снижается стоимость при использовании модульного и макромодульного принципов построения схем.

Низкая себестоимость систем пневмоники определяется еще и возможностью изготовления коммуникационных каналов между элементами внутри блока также прессованием, штамповкой или фототравлением, при этом стоимость изготовления коммуникационных плат приборов пневмоники становится соизмеримой со стоимостью изготовления струйных элементов.

Важным фактором в снижении себестоимости приборов пневмоники является простота в их настройке и эксплуатации. Вследствие этого сводится к минимуму роль обслуживающего персонала. Для эксплуатации струйных систем требуются специалисты, в основном, механики низкой квалификации, так как простота и наглядность работы струйных элементов позволяет им овладеть необходимыми знаниями за короткое время.

Элементы пневмоники работают на низких давлениях, поэтому отпадает необходимость в использовании защитных приспособлений и блокировок. Это также снижает стоимость струйных систем.

Неограниченные ресурсы воздуха, используемого в качестве рабочей среды, и простота получения низких давлений (достаточно сказать, что выдох человека средних физических данных создает давление в  $10^4$  Па, в то время как приборы и элементы пневмоники работают при давлении в 10 раз ниже) еще более снижают стоимость эксплуатации. Для питания систем пневмоники используют маломощные вентиляторы.

Можно использовать в качестве рабочей среды и отработанные газы, что имеет особое значение при создании систем управления ракетами, космическими объектами.

В качестве рабочей среды в элементах пневмоники используется воздух, поэтому струйные элементы помехоустойчивы при воздействии радиации, электрических и магнитных полей, обладают пожаро- и взрывобезопасностью.

При выборе соответствующего материала элементы и устройства пневмоники могут работать при высоких температурах. В настоящее время созданы элементы из керамики, которые работают при температурах более  $1000$  °С, в то же время струйные элементы работоспособны при сверхнизких температурах.

Стойкость к механическим воздействиям зависит от подбора материала. В настоящее время разработаны струйные элементы, которые при воздействии больших механических нагрузок не только не разрушаются, но и не теряют работоспособности. Струйные элементы хорошо переносят вибрационные нагрузки и тряску.

Стойкость к воздействию электрических и магнитных полей определяется природой рабочей среды (воздуха). Выбором конструктивного материала определяется стойкость элементов и приборов пневмоники по отношению к воздействию ядовитых сред, сред с повышенной влажностью, насыщенных пылью.

Благодаря отсутствию механических подвижных частей и низким рабочим давлениям элементы пневмоники обладают высоким по сравнению с другими элементами автоматики (кроме электронных) быстродействием. Быстродействие составляет 1 кГц и выше.

Пневмоника не может конкурировать с электроникой в тех случаях, когда требуется за короткий промежуток времени обработать большое количество информации.

Внедрение схем, реализованных на элементах пневмоники, в промышленности затрудняется, во-первых, из-за низкого уровня входных и выходных сигналов, во-вторых, из-за невысокой помехоустойчивости. Чтобы использовать положительные качества струйных элементов и избежать отрицательных, применяют комбинированную струйно-мембранную технику. Основные функции системы реализуются на быстродействующих и малогабаритных струйных элементах, а на выходе системы устанавливают мембранные усилители, усиливающие выходной сигнал как по давлению, так и по мощности.

## 10.2. Аэродинамические эффекты, используемые при создании струйных элементов

Любой струйный элемент представляет собой совокупность обладающих определенной формой и определенным образом взаимно ориентированных каналов, по которым протекают потоки воздуха. При этом используют известные аэродинамические эффекты [9, 12].

*Эффект турбулизации струи* заключается в том, что если  $P_{упр} = 0$  (рис. 10.1, а), то ламинарная струя питания  $P_{пит}$  поступает в приемное сопло. При этом в приемном сопле устанавливается давление  $P_{вых} \approx P_{пит}$ .

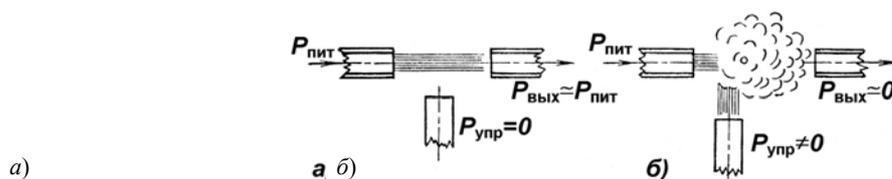


Рис. 10.1. Эффект турбулизации струи

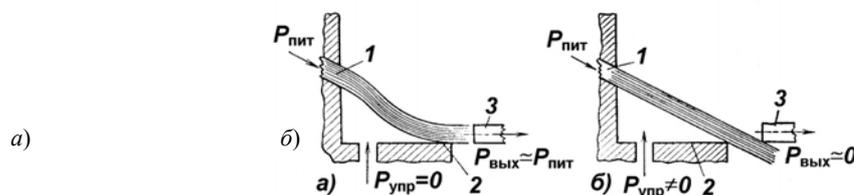


Рис. 10.2. Эффект притяжения струи к стенке (эффект Коанда)

При  $P_{упр} \neq 0$  (рис. 10.1, б) струя, вытекающая из сопла питания, турбулизируется и давление в приемном сопле  $P_{вых}$  падает до величины, близкой к нулю.

*Эффект притяжения струи к стенке* (эффект Коанда, рис. 10.2). Струя рабочей среды, вытекающая из сопла питания 1 под углом к стенке 2, касается ее в некоторой точке и эжектирует воздух из зоны, ограниченной струей и стенкой. В результате в этой зоне создается пониженное давление, и струя прилипает к стенке (рис. 10.2, а). Если на уровне стенки установить приемное сопло 3, то в нем при  $P_{упр} = 0$

возникает давление  $P_{\text{вых}} \approx 1$ . При подаче  $P_{\text{упр}} \neq 0$  (рис. 10.2, б) и по мере его увеличения струя выходит за пределы стенки и давление в приемном сопле 3 исчезнет.

**Эффект взаимодействия струй.** Струи  $P_{\text{пит}}$  и  $P_{\text{упр}}$ , взаимодействуя между собой, создают третью струю, не совпадающую с ними (рис. 10.3). Если на пути третьей струи расположить приемное сопло, то давление  $P_{\text{вых}}$  будет изменяться в соответствии с графиком на рис. 10.3.

**Эффект ударной модуляции** (принцип взаимодействия двух противоположно направленных соосных струй).

При взаимодействии двух противоположно направленных соосных газовых струй (рис. 10.4) плоскость соударения будет смещаться в сторону сопла, вытекающая из которого струя газа имеет меньшую скорость.

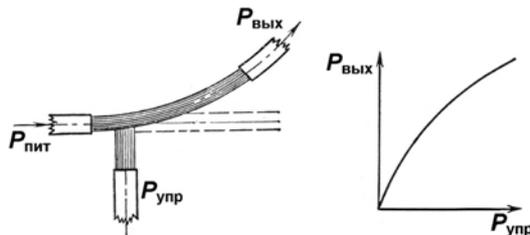


Рис. 10.3. Эффект взаимодействия струй

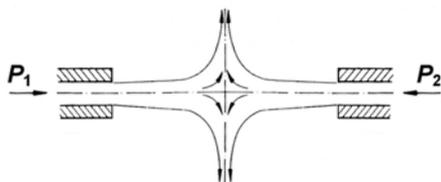


Рис. 10.4. Эффект ударной модуляции (принцип взаимодействия двух противоположно направленных соосных струй)

### 10.3. СТРУЙНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

В настоящее время разработано большое количество струйных усилителей, в основу работы которых положены различные рассмотренные ранее эффекты.

**Турбулентный усилитель** (рис. 10.5). Этот усилитель основан на эффекте турбулизации ламинарного потока при воздействии на него струей воздуха. Геометрические размеры канала питания 1 выбраны из условия формирования в нем ламинарной струи питания.

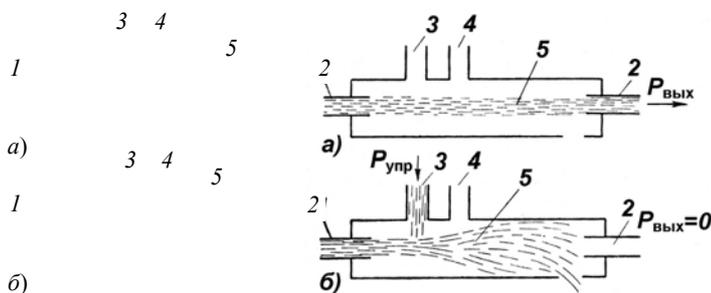


Рис. 10.5. Турбулентный струйный усилитель:

а – при отсутствии управляющего сигнала;

б – при наличии управляющего сигнала

При отсутствии управляющего сигнала (рис. 10.5) ламинарная струя 5 распространяется без нарушения структуры на значительное расстояние и попадает в выходной канал 2. Выходное давление  $P_{\text{вых}}$  имеет при этом значительную величину. При появлении любого из управляющих сигналов  $P_{\text{упр}}$  (рис. 10.5) в каналах 3 и 4 в месте взаимодействия ламинарной струи питания и управляющей струи происходит резкая турбулизация струи питания 5.

В результате этого количество воздуха, попадающего в выходной канал 2, уменьшается, при этом уменьшаются расход и давление воздуха на выходе ( $P_{\text{вых}} = 0$ ). При снятии управляющего сигнала восстанавливается ламинарная структура струи питания, и выходной сигнал увеличивается до начальной величины.

Усилители, основанные на эффекте прилипания струи к стенке.

*Бистабильный усилитель* (рис. 10.6) имеет два устойчивых состояния и потому называется бистабильным.

При подаче воздуха в канал 1 струя питания попадает в один из выходных каналов 5 или 6. Струю питания можно переключать от одного выходного канала к другому с помощью управляющего канала, подаваемого к ближайшему по отношению к струе питания входному каналу.

В начальный момент времени струя питания попадает в выходной канал 5. При протекании струи питания вблизи внешней стенки выходного канала в районе полости взаимодействия 3 между струей и внешней стенкой канала 5 создается область малого давления. В результате струя питания остается в левом переключенном положении в устойчивом состоянии.

Если повести управляющий сигнал к входному каналу 2, то область низкого давления между струей питания и внешней стенкой канала 5 исчезнет. Струя питания переключится в правый выходной канал 6, при этом в области взаимодействия 3 между струей и внешней стенкой канала 6 создается область малого давления. Струя сохраняет свое устойчивое состояние после снятия сигнала в канале 2. Переключение струи в выходной канал 5 осуществляется подачей управляющего сигнала во входной канал 7.

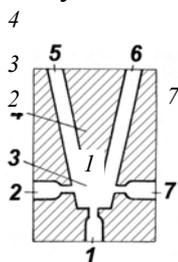


Рис. 10.6. Бистабильный струйный усилитель

*Моностабильный усилитель* (рис. 10.7). Бистабильный усилитель превращается в моностабильный с одним устойчивым состоянием, если один из его управляющих каналов 7 (рис. 10.6) соединить с атмосферой. При переключении струи питания в правое положение области низкого давления между струей питания и внешней стенкой канала 6 не образуется, так как с этой стороны эта полость взаимодейст-5 вия соединена с атмосферой. Поэтому при снятии управляющего сигнала струя питания возвращается в левый выходной канал 5.

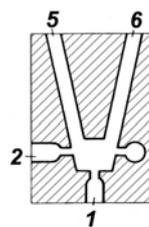


Рис. 10.7. Моностабильный струйный усилитель

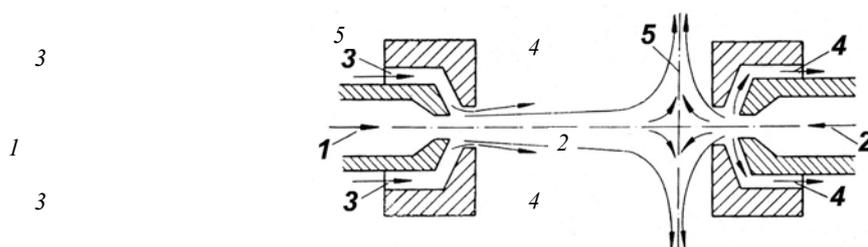
Усилитель выполняет по каналу 5 логическую функцию "НЕ", а по каналу 6 – функцию "ДА".

Небольшая асимметричность конструкции бистабильного усилителя (рис. 10.6) также превращает его в моностабильный.

*Пропорциональный усилитель с ударной модуляцией* (рис. 10.8). Усилитель основан на использовании принципа взаимодействия двух противоположно направленных соосных струй. Давление струй, вытекающих из каналов питания 1 и 2, выбирается таким, чтобы плоскость соударения 5 при отсутствии управляющего сигнала располагалась ближе к входному концу приемного канала, снабженному ножевой кромкой.

При подаче управляющего сигнала в кольцеобразный канал 3 струя питания, вытекающая из канала 1, фокусируется, при этом плоскость соударения струй 5 перемещается вправо. При определенном значении управляющего сигнала плоскость соударения струй 5 перемещается вправо. При определенном значении управляющего сигнала плоскость соударения струй 5 достигает входного конца приемного канала. Дальнейшее увеличение управляющего сигнала приводит к возрастанию выходного давления в кольцеобразном приемном канале 4.

Усилитель позволяет получить высокий коэффициент усиления по давлению (до 200) и может быть использован в качестве операционных усилителей при реализации интеграторов, сумматоров, умножителей и др.



### Рис. 10.8. Пропорциональный струйный усилитель с ударной модуляцией

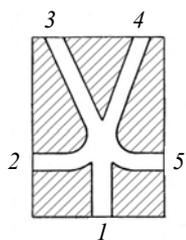


Рис. 10.9. Бистабильный струйный индукционный усилитель

*Бистабильный индукционный усилитель* (рис. 10.9) основан на использовании эффекта Коанда. Струя питания, вытекающая из канала 1, перемещается вдоль одного из двух аэродинамических профилей и попадает в левый или правый выходной канал (3 или 4). Появляющийся управляющий поток в канале 2 или 5 также распространяется вдоль профиля.

Между струей питания и управляющим потоком создается область малого давления, в результате чего струя питания переключается к той стенке, вдоль которой движется управляющий поток.

### 10.4. РЕАЛИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ НА СТРУЙНЫХ РЕЛЕ

Логические функции реализуются с помощью струйных реле, действие которых основано на эффекте взаимодействия свободных струй и на явлении прилипания струи к стенке.

Схема, представленная на рис. 10.10, предназначена для выполнения логических операций на струйных реле, работающих на эффекте взаимодействия свободных газовых струй.

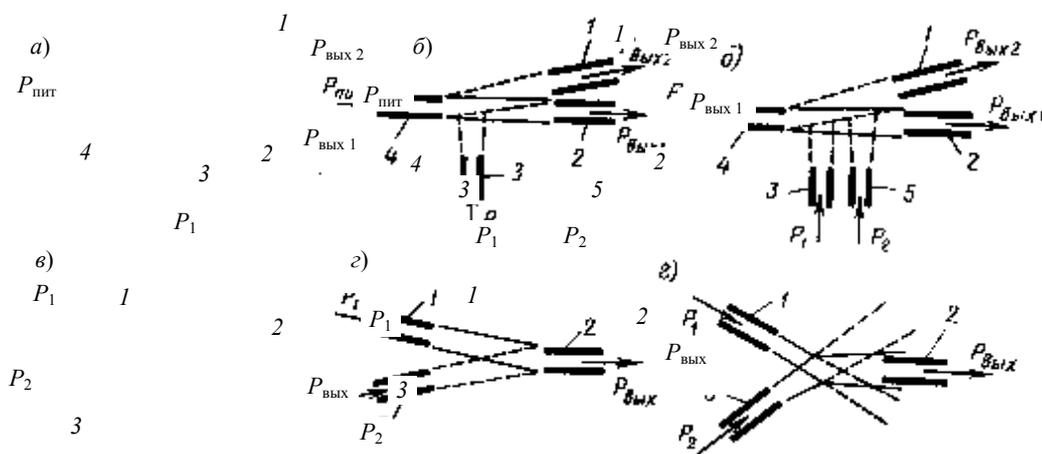


Рис. 10.10. Реализация логических функций на струйных реле, действие которых основано на эффекте взаимодействия свободных струй

Схема, представленная на рис. 10.10, а предназначена для выполнения операций "НЕ" и "ДА". По каналу 4 поступает воздух питания; канал 3 – управляющий. При отборе давления  $P_{\text{ВЫХ1}}$  из канала 2 реле выполняет операцию "НЕ", а при отборе давления  $P_{\text{ВЫХ2}}$  из канала 1 – операцию "ДА".

Схема, приведенная на рис. 10.10, б, активно реализует операцию "ИЛИ" по каналу 1 и операцию "стрелка Пирса" по каналу 2 при подаче давлений управления  $P_1$  и  $P_2$  в каналы 3 и 5.

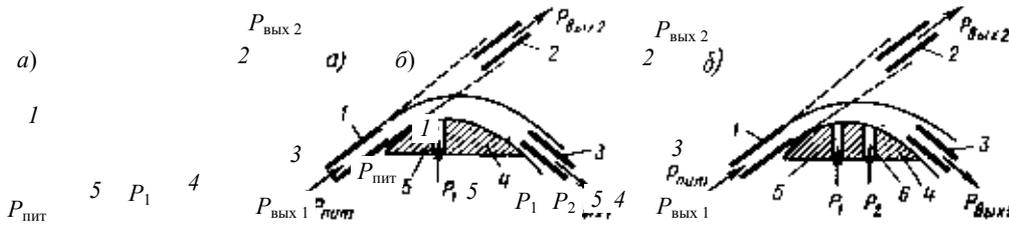
На рис. 10.10, в, г показаны схемы реле, реализующие операции "ИЛИ" и "И" пассивно. Входные давления  $P_1$  и  $P_2$  поступают в каналы 1 и 3, а канал 2 – выходной. Эти схемы отличаются друг от друга различным расположением входных и выходных каналов по отношению друг к другу.

В схеме (рис. 10.10, в) сигнал на выходе возникает как результат взаимодействия струй, вытекающих из каналов 1 и 3, т.е. при наличии давлений одновременно на входе обоих каналов. В схеме (рис. 10.10, г) струи из каналов 1 и 3 попадает в канал 2 независимо друг от друга.

Реализации логических операций с помощью струйных реле, действие которых основано на явлении прилипания струи к стенке, показаны на рис. 10.11.

В струйных реле (рис. 10.11, а), когда непрерывно увеличивающееся давление  $P_1$  в канале 5 достигает определенной величины, поток воздуха, вытекающий из канала питания 1, отрывается от стенки 4 и получает направление, показанное на рисунке пунктирными линиями. При этом скачком изменяется давление на выходах 2 и 3 (давление  $P_{\text{ВЫХ1}} = 0$ , а давление  $P_{\text{ВЫХ2}} = 1$ ). При отборе сигнала из канала 2 – операция "ДА".

Осуществление операции "И" достигается тем, что стенка соответствующим образом профилируется и в ней выполняются два управляющих канала 5 и 6 (рис. 10.11, б).



**Рис. 10.11. Реализации логических операций с помощью струйных реле, действие которых основано на явлении прилипания струи к стенке**

Для отрыва потока от стенки и создания давления в выходном канале 2 необходимо подать давления  $P_1$  и  $P_2$  заданной величины на входы обоих каналов; таким образом, при использовании канала 2 реализуется операция "И", а при использовании канала 3 – операция "штрих Шеффера".

Если в рассмотренном реле профиль стенки выбрать так, чтобы отрыв струи происходил при подаче одного из давлений  $P_1$  или  $P_2$ , то такое струйное реле реализует операцию "ИЛИ" при использовании выходного канала 2 и функцию "стрелка Пирса" – при использовании выходного канала 3.

### 10.5. СТРУЙНЫЕ ДИОДЫ

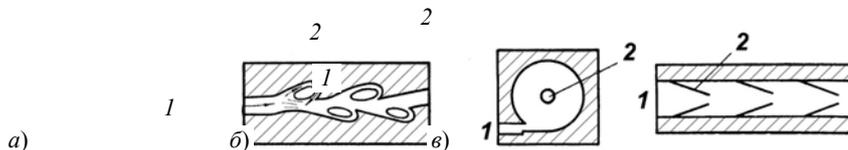
Струйные диоды имеют большое сопротивление потоку в одном направлении и малое – в противоположном. Они в зависимости от используемого эффекта могут быть резисторного и дефлекторного типов.

В качестве резисторных струйных диодов используются, например, элемент Тесла, предложенный еще в 1916 г. (рис. 10.12, а), вихревой и сопловой диоды. При движении потока слева направо в диоде Тесла части потока, ответвляющиеся в боковые каналы, разрушают основной поток. При движении же потока справа налево сопротивление потоку мало. Отношение сопротивления в обоих направлениях (диодность  $D$ ) у такого диода достигает 20.

Поперечное сечение вихревого диода представлено на рис. 10.12, б. Когда поток входит в центральное входное отверстие 2, он следует в радиальном направлении к тангенциальному отверстию 1 с небольшим сопротивлением. Если поток подается на тангенциальный вход 1, то устанавливается вихревое движение и поток следует по спирали к отверстию 2, а сопротивление устройства резко возрастает.

На рис. 10.12, в показано поперечное сечение сопловой диода, где 1 – входное отверстие и 2 – направляющие ребра, вызывающие возмущение потока при движении его справа налево.

В качестве струйного диода рефлекторного типа может использоваться модификация турбулентного усилителя, в которой одна из соосно расположенных трубок имеет конусообразное расширение на конце. Когда поток подается в трубку с конусностью, происходит его турбулизация и рассеяние, лишь небольшая часть попадает к выходу. Если поток подан на вход второй трубки, то течение остается ламинарным и большая часть потока попадает в расширяющуюся трубку.



**Рис. 10.12. Струйные резисторные диоды:**  
а – диод Тесла; б – вихревой диод; в – сопловой диод

### 10.6. СТРУЙНЫЕ УСТРОЙСТВА ПАМЯТИ

Операцию запоминания струйных сигналов можно реализовать элементами, в основу работы которых положен эффект Коанда, и элементами, работающими на эффекте отклонения струй.

На рис. 10.13, а приведена схема струйного устройства памяти, работающего на эффекте отклонения струй. При отсутствии выходного сигнала струя газа, вытекающего из канала питания 1, первоначально попадает в приемный канал 2 и создает в нем давление  $P_{вх1}$ . При поступлении сигнала  $P_{вх}$ , вы-

текающего из сопла 5, отклоняет основную струю в приемный канал 3. В этом канале создается давление  $P_{\text{вых2}}$ , которое сохраняется и при отсутствии сигнала  $P_{\text{вх}}$ , так как струя газа, вытекающего из канала 6 положительной обратной связи, продолжает удерживать основную струю в направлении канала 3. Для возвращения струи в исходное положение ("стирание") необходимо подать сигнал  $P_c$  через канал 4.

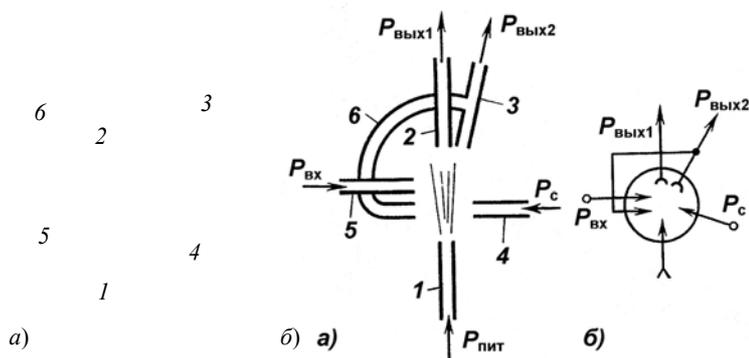


Рис. 10.13. Струйное устройство памяти

Условное обозначение струйного устройства памяти приведено на рис. 10.13, б.

## 10.7. СТРУЙНЫЕ ТРИГГЕРЫ С РАЗДЕЛЬНЫМИ ВХОДАМИ

Струйные триггеры с отдельными входами обычно создают с использованием струйных устройств памяти.

Рассмотрим струйный триггер с отдельными входами, работающий на эффекте отклонения струй (рис. 10.14, а). К каналу 1 подводится воздух питания под давлением  $P_{\text{пит}}$ . Струя воздуха, выходящая из этого канала, попадает в приемные каналы 4 и 5, создавая в них одинаковые давления. При подаче в боковые управляющие каналы 7 или 2 управляющих давлений  $P_{\text{вых1}}$  или  $P_{\text{вых2}}$  струя отклонится в сторону противоположного бокового канала. Например, при подаче давления  $P_{\text{вых1}}$  струя воздуха отклонится влево и попадает в приемный канал 4, давление в котором увеличивается. Из канала 4 она по линии положительной обратной связи поступит в канал 6. Струя, вытекающего из канала, заставляет струю воздуха течь в приемный канал 4 даже тогда, когда давление  $P_{\text{вх1}}$  в управляющем канале 7 становится равным нулю. В таком положении на выходе канала 4 будет сигнал равный единице, а на выходе канала 5 – нулю. Для переключения триггера в противоположное состояние необходимо подать давление  $P_{\text{вх2}}$  в управляющий канал 2. При этом струя воздуха переключится в канал 5 и останется в этом положении после исчезновения давления  $P_{\text{вх2}}$  за счет действия струи положительной обратной связи, вытекающей из канала 3. При этом положении имеет в канале 5 сигнал, равный единице, а в канале 4 – нулю.

На рис. 10.14, б показан пневматический струйный триггер с отдельными входами, работающий на эффекте прилипания струи к стенке. К каналу 7 подводится воздух питания под давлением  $P_{\text{пит}}$ . Выходящая струя воздуха попадает в приемные каналы, создавая в них одинаковые давления. При подаче в управляющий канал 7 давления  $P_{\text{вх1}}$  струя воздуха отжимается влево и прилипает к стенке 3 (около стенки при определенной конфигурации устройства возникают циркуляционные течения, сопровождающиеся понижением давления). Струя остается в таком положении и после снятия сигнала управления  $P_{\text{вх1}}$ . При этом в канале 4 давление равно единице, а в канале 5 – нулю.

При переключении триггера подается давление  $P_{\text{вх2}}$  в управляющий канал 2, тогда струя воздуха прилипает к стенке 6. Давление в канале 5 при этом равно единице, а в канале 4 – нулю, т.е. триггер переключается в другое стабильное положение.

## 10.8. СТРУЙНЫЙ ТРИГГЕР СО СЧЕТНЫМ ВХОДОМ

Струйный триггер со счетным входом (рис. 10.15) основан на использовании эффекта Коанда. Струя питания, вытекающая из канала 1 в начальный момент может прилипнуть к стенке 1 или 4 и соответственно попасть в выходной канал 5 или 6. Если она попала в выходной канал 5, то вследствие появления области малого давления между струей и стенкой 3 образуется подсос воздуха, и в кольцеобразном канале 7 устанавливается циркуляционное течение, направленное против часовой стрелки.

При появлении первого счетного сигнала в управляющем канале 2 выходящая из этого канала струя отклоняется циркуляционным течением вправо и под влиянием результирующего воздействия циркуляци-

онного течения и управляющей струи в канале 7 струя питания перебрасывается из выходного канала 5 в канал 6 (примыкает к стенке 4), давления между струей и циркуляционное течение в канале ложное, появление второго струи питания к стенке 3 и Таким образом, при сигналах по управляющему канале 5 через раз. Элементом два (функция триггера со

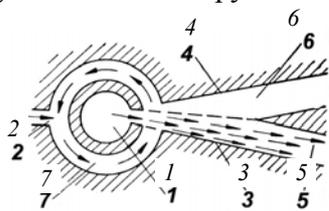


Рис. 10.15. Триггер со счетным входом

при этом образуется область малого питания и стенкой 4, в результате чего 7 меняет свое направление на противоположное в канале 2 вызывает переброс появления выходного сигнала в канале 5. последовательной подаче счетных каналу 2 выходные сигналы появляются в выполняется функция деления сигналов на счетным входом).

## 10.9. СТРУЙНЫЙ ГЕНЕРАТОР КОЛЕБАНИЙ

Рассмотрим генератор колебаний, построенный на базе струйного устройства памяти, схема которого представлена на рис. 9.16. Струйное устройство памяти имеет два устойчивых состояния, определяемые сигналами  $P_{\text{вых1}}$  и  $P_{\text{вых2}}$ .

Генератор работает следующим образом. Струя воздуха, поступающего из канала питания 1, проходит к выходному каналу 4, где создается давление  $P_{\text{вых1}}$ . Через некоторый интервал времени, зависящий от объема емкости  $V_1$  и величин сопротивлений  $R_1$  и  $R_{\text{вых}}$ , величина давления в емкости  $V_1$ , а следовательно, и в канале 5 увеличивается до значения  $P_{\text{упр1}}$ , что достаточно для отклонения основной струи и переключения ее в канал 3. В результате давление в канале 3 увеличивается и становится равным  $P_{\text{вых1}}$ . При этом возрастает давление в канале 3 и в емкости  $V_2$  и через некоторый интервал времени, определяемый величиной емкости  $V_2$  и проводимостью сопротивления  $R_2$ , в емкости  $V_2$ , а следовательно, и в канале 2 будет давление  $P_{\text{упр2}}$ , достаточное по величине для переключения основной струи из канала 3 в канал 4.

Описанный выше цикл затем повторяется периодически.

Струя, вытекающая из канала 6, стабилизирует основную струю при ее переключении в канал 3.

Особенность

изменять частоту колебаний изменения проводимостей так и путем изменения давления использовать генератор для частоту. Действительно, с и давление  $P_{\text{вых1}}$ , давление же струи из одного положения в первом приближении можно величины давления питания. сопротивлений при изменении изменяются. Поэтому время нарастания давления  $P_{\text{упр}}$  от нуля до величины  $P_{\text{п}}$ , при котором происходит переключение струи, уменьшается.

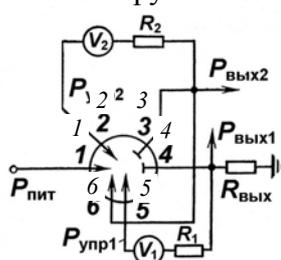


Рис. 10.16. Струйный генератор колебаний давления, работающий на эффекте отклонения струи

рассмотренного генератора – возможность давления на его выходе как путем сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , емкостей  $V_1$  и  $V_2$ ,  $P_{\text{пит}}$ . Последнее обстоятельство позволяет создания преобразователей давления в увеличении давления  $P_{\text{пит}}$  увеличивается  $P_{\text{упр1}}$ , необходимое для переключения другое, изменяется незначительно, в считать, что это давление не зависит от Постоянные времени цепей из емкостей и давления питания практически не

Форма колебаний давления, получаемых на выходе генератора, близка к прямоугольной.

### Вопросы для самостоятельной работы студентов

1. Перечислите достоинства и недостатки элементов и устройств пневмоники.
2. Как Вы понимаете разделение струйных элементов на активные и пассивные?
3. Сущность эффекта турбулизации газовой струи.
4. За счет чего газовая струя притягивается к твердой стенке в элементах, принцип работы которых основан на эффекте Коанда?
5. Что необходимо выполнить для отрыва струи от стенки?
6. За счет чего при взаимодействии свободных газовых струй происходит отклонение питающей струи?
7. Объясните физическую сущность эффекта ударной модуляции.
8. Как расположены сопла в элементе, использующем ударную модуляцию?
9. Почему в бистабильном усилителе выходная струя может находиться в двух устойчивых положениях?

10. Что необходимо изменить в конструкции бистабильного усилителя, чтобы он стал моностабильным усилителем?
11. Принцип работы пропорционального струйного усилителя с ударной модуляцией.
12. Конструктивные особенности и принцип работы бистабильного струйного индукционного усилителя.
13. Конструктивные особенности струйных диодов и особенности их работы.
14. Какие струйные диоды Вы знаете?
15. С какой целью применяют струйные диоды в устройствах контроля и управления?
16. Устройство памяти, работающее на эффекте отклонения струй.
17. Струйные триггеры с отдельными входами. Конструкции и принцип действия.
18. Каким образом работает струйный триггер со счетным входом?
19. Особенности работы струйного генератора колебаний давления, работающего на эффекте отклонения свободных газовых струй.

Каковы перспективы развития средств пневмоники?

## **11. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА**

---

---

### 11.1. Исполнительное устройство – звено системы автоматического управления

Для увеличения технико-экономической эффективности от внедрения систем автоматизации и автоматизированных систем управления предъявляются повышенные требования к надежности работы всех блоков этих систем, в том числе и исполнительных устройств.

Каждая система регулирования (управления) является замкнутой динамической системой, предназначенной для автоматического поддержания желаемого значения одной или нескольких величин, характеризующих нормальное протекание какого-либо производственного или технологического процесса, в течение длительного времени и при произвольно меняющихся внешних возмущающих факторах.

На рис. 11.1 показана структурная схема системы автоматического регулирования.

Качество работы системы регулирования определяется характером переходного процесса. Скорость затухания переходного процесса и устойчивость регулирования зависят не только от статических и динамических свойств объекта регулирования, но и от свойств регулятора. Каждый регулятор в контуре регулирования состоит из нескольких функциональных блоков и элементов, производящих измерение регулируемой величины, ее преобразование в требуемый сигнал, формирование командной информации и сигнала, воздействующего посредством исполнительного устройства на технологический процесс.

*Исполнительным устройством* называется такое устройство, с помощью которого осуществляется воздействие на технологический процесс в соответствии с получаемой командной информацией в режиме автоматического регулирования или при дистанционном, или ручном управлении. В упрощенном виде структурная схема контура регулирования может быть изображена так, как показано на рис. 11.1. В этой схеме регулятор расчленен на функциональные блоки. Связующим блоком между объектом регулирования и функциональными блоками регулятора является исполнительное устройство, которое согласно выбранному закону регулирования осуществляет соответствующее регулирующее воздействие на процесс регулирования.

Расчет регулятора ведется применительно к свойствам объекта регулирования на основании его кривой разгона или частотной характеристики. Кроме того, при расчете необходимо учитывать свойства исполнительных устройств, так как эти устройства являются неотъемлемым звеном системы регулирования.

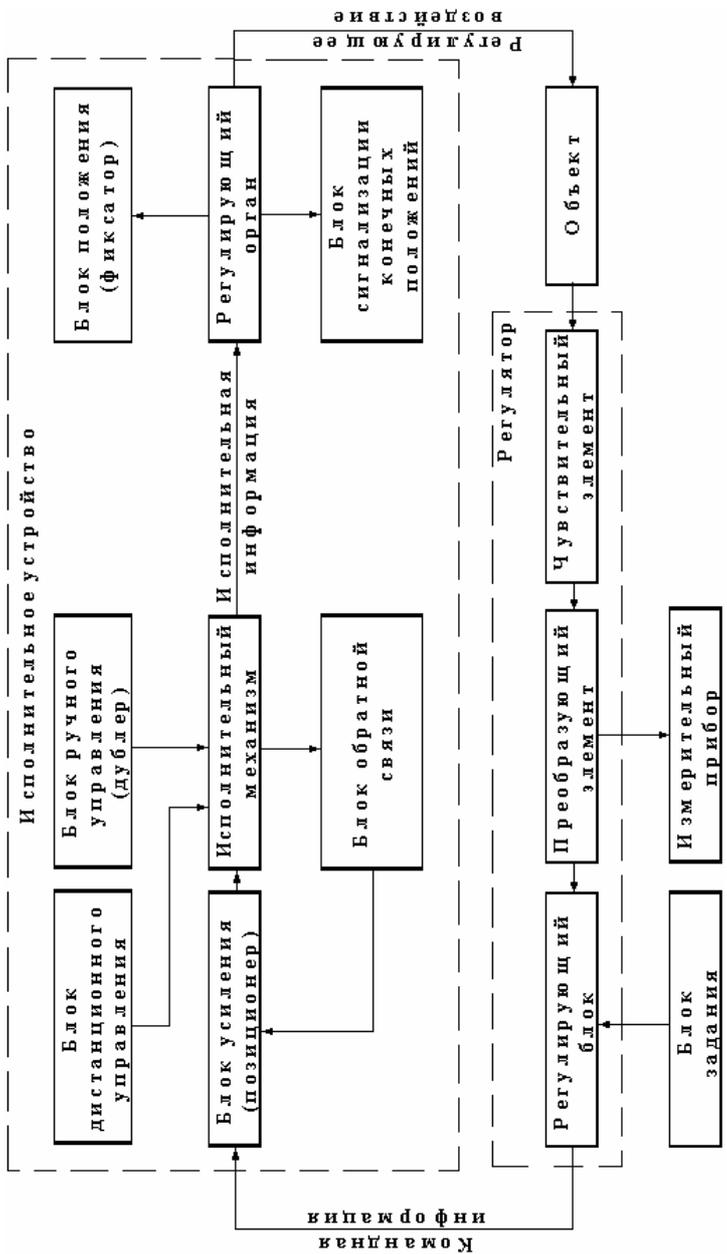


Рис. 11.1. Структурная схема системы автоматического регулирования

Регулирующее воздействие от исполнительного устройства должно изменять процесс в требуемом направлении для достижения поставленной задачи – стабилизации регулируемой величины. Это воздействие может осуществляться различными способами, а именно:

- изменением количества поступающего вещества за счет дросселирования его потока или за счет изменения производительности агрегата;
- изменением количества вносимого тепла за счет изменения поступающего теплоносителя или топлива;
- изменением дозы вещества за счет изменения направления его поступления или скорости вращения приводного механизма подачи этого вещества, периодического включения или выключения агрегатов, прекращения подачи вещества или останова агрегатов в целях исключения аварийных производственных ситуаций.

Возможны комбинации этих способов. Для осуществления одного из указанных способов регулирующего воздействия могут быть использованы исполнительные устройства с различными принципами действия и конструктивным исполнением.

Осуществление регулирующего воздействия достигается работой двух основных и нескольких дополнительных блоков исполнительного устройства.

К основным блокам исполнительного устройства относятся исполнительный механизм и регулирующий орган, которые конструктивно могут быть объединены в единое устройство (изделие) или могут быть собраны из индивидуально выпускаемых блоков.

Под *исполнительным механизмом* в общем случае подразумевают блок исполнительного устройства, преобразующий входной командный сигнал от регулятора в сигнал, который через соответствующую связь осуществляет исполнительное воздействие на регулируемый орган.

*Регулирующим органом* называют блок исполнительного устройства, с помощью которого на основании полученного исполнительного сигнала производится регулирующее воздействие на объект регулирования.

В зависимости от конкретных условий работы к исполнительному устройству иногда подключают функциональные дополнительные блоки с целью расширения области использования этих устройств. Таким образом, структурная схема исполнительного устройства может быть усложнена и может иметь большое количество вариантов в зависимости от комбинаций включения этих функциональных дополнительных блоков. Так на рис. 11.1 в качестве функциональных дополнительных блоков показаны блоки дистанционного управления, указатель положения и др.

## 11.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В настоящее время нет окончательно отработанной классификации существующих разновидностей исполнительных устройств, а поэтому рассматриваемая классификация может быть расширена и уточнена в соответствии с проводимыми усовершенствованиями.

Классификация исполнительных устройств, приводимая ниже, составлена в зависимости от вида потребляемой энергии, принципа действия исполнительных механизмов (ИМ) и конструктивного исполнения регулирующих органов (РО).

Исполнительные устройства в зависимости от используемой энергии можно подразделять на следующие виды:

- пневматические (с пневматическим ИМ);
- электрические (с электрическим ИМ);
- гидравлические (с гидравлическим ИМ);
- электропневматические (пневматический ИМ с электропневматическим преобразователем);
- электрогидравлические (гидравлический ИМ с электрогидравлическим преобразователем);
- пневмогидравлические (гидравлический ИМ с пневмогидравлическим преобразователем).

В зависимости от конструктивных особенностей РО исполнительные устройства подразделяют на виды:

- заслоночное;
- односедельное;
- двухседельное;
- трехходовое;
- шланговое;
- диафрагмовое.

Полное комплексное наименование исполнительного устройства составляется на основании указанного разделения, а именно, если пневматический исполнительный механизм сочленен с заслоночным регулирующим органом, то его полное комплексное наименование – "пневматическое заслоночное исполнительное устройство", а его сокращенное обозначение образуется из первых букв наименования, но с исключением слова "исполнительное", т.е. в приведенном примере исполнительное устройство может быть обозначено ПЗУ.

Помимо общеизвестных и широкоупотребляемых регулирующих органов, отмеченных выше, для целей регулирования технологических процессов используются:

- задвижки, шиберы, вентили, краны, посредством которых изменяют расходы технологических сред для поддержания заданного значения регулируемой величины;
- направляющие аппараты, позволяющие изменять производительность тягодутьевых агрегатов;
- плужковые сбрасыватели, воздействующие на изменение направления потока сыпучих веществ;
- реостаты, изменение электрического сопротивления которых вызывает изменение силы тока в электрических цепях, что обеспечивает регулирующее воздействие на процесс (например, регулирование температуры при помощи электронагревателей);
- специальные приспособления и устройства, обеспечивающие тем или иным путем получение необходимого регулирующего воздействия.

Кроме того, в качестве РО может быть использовано технологическое оборудование, а именно: насосы, компрессоры, транспортные механизмы, шнековые, пластинчатые и дисковые питатели.

Большое количество и разнообразие исполнительных механизмов и регулирующих органов, различающихся по конструкции, типам и размерам, позволяет синтезировать исполнительные устройства применительно к конкретным требованиям регулируемой среды, условиям эксплуатации и результатам произведенных расчетов для каждой системы регулирования.

### 11.3. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ

Исполнительные пневматические механизмы предназначены для преобразования входного сигнала давления, поступающего от регулирующего или командного прибора, в перемещение регулирующего органа, который изменяет приток или сток вещества или энергии в объект управления.

Всякий исполнительный пневматический механизм состоит из привода, воспринимающего командный сигнал давления, и регулирующего органа.

Исполнительные механизмы, входящие в системы автоматического регулирования, должны развивать достаточные перестановочные усилия для преодоления сил, противодействующих перемещению регулирующего органа на всем диапазоне перемещений, обладать детектирующими свойствами, иметь чувствительность, люфт и гистерезис, соизмеримые с аналогичными показателями других элементов системы.

По принципу действия исполнительные пневматические механизмы делят на механизмы поступательного движения, вращательного движения и струйные.

В свою очередь механизмы поступательного движения делят на поршневые, мембранные и сифонные, а механизмы вращательного движения – на шестеренчатые, лопастные и поршневые.

### 11.4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

В исполнительных механизмах с мембранным приводом перемещение регулирующего органа вызывается прогибом эластичной мембраны. Мембранный привод в настоящее время получил наибольшее распространение из-за отсутствия механического трения в уплотнениях и большей по сравнению с другими приводами чувствительностью к давлению.

Элементом, который преобразует входное давление в перемещение штока привода, служит эластичная мембрана 2 (рис. 11.2) с жестким центром 1. Усилие, развиваемое эластичной мембраной с жестким центром, зависит от эффективной площади мембраны. Пропорциональность между входным давлением  $P_{вх}$  и ходом  $x$  штока 4 достигается за счет сил деформации уравновешивающей пружины 3.

Усилие, развиваемое мембранным приводом, при стандартных давлениях  $(0,2...1,0) \cdot 10^5$  Па ( $0,2...1,0$  кгс/см<sup>2</sup>) может достигать 500 и более килограммов.

Мембранные приводы могут быть одинарного и двойного действия.

На рис. 11.2, а, б показаны схемы мембранных приводов одинарного действия с пружиной под мембраной и над мембраной.

Как в том, так и в другом приводе пружины работают на сжатие при подаче входного давления. В приводах одинарного действия возврат штока в исходное положение осуществляется с помощью пружины.

В приводах двойного действия (рис. 11.2, в) давление воздуха управления подается с двух сторон мембраны. Поэтому движение штока в обоих направлениях вызывается подачей сжатого воздуха по ту или другую сторону мембраны.

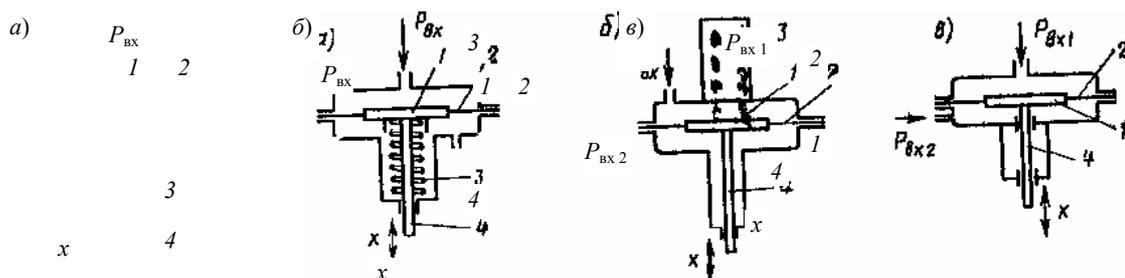


Рис. 11.2. Принципиальные схемы мембранных приводов  
11.5. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ПОЗИЦИОНЕРЫ

Однозначная зависимость между входным давлением и ходом штока мембранного привода в процессе эксплуатации может меняться из-за изменяющихся сил трения в узлах регулирующего органа и привода. Для устранения этих явлений, а также для увеличения чувствительности исполнительных механизмов применяют специальные усилители давления с обратной связью по положению штока привода. Подобные усилители называются позиционерами и устанавливаются непосредственно на приводе.

В зависимости от принципа действия пневматические позиционеры подразделяют на позиционеры, работающие по схеме компенсации перемещений и схеме компенсации сил.

Схема позиционера, работающего по схеме компенсации перемещений, показана на рис. 11.3, а. Давление  $P_{вх}$  поступает в сильфон 6. Увеличение входного давления приводит к деформации сильфона, что в свою очередь вызывает уменьшение сброса воздуха в атмосферу через клапаны 5 усилителя мощности 1. Поэтому расход воздуха, поступающего от усилителя мощности к приводе 2, увеличивается. При этом шток 3 привода перемещается вниз и увлекает за собой рычаг 4, который приоткрывает клапаны 5 и увеличивает сброс воздуха в атмосферу.

Шток 3 перемещается до тех пор, пока не займет положение, пропорциональное поданному входному давлению, с точностью до статической ошибки. Таким образом, обратная связь по положению штока обеспечивает его однозначную установку в положение, соответствующее командному давлению. Это положение не зависит от величины трения в элементах приводами регулирующего органа.

Большой точностью в работе обладают позиционеры, построенные по схеме компенсации усилий (рис. 11.3, б). Входное давление  $P_{вх}$  поступает в камеру А и создает усилие на мембранах 4, имеющих разные эффективные площади (у нижней мембраны эффективная площадь больше, чем у верхней). Клапан 3 перемещается вниз и увеличивает подачу воздуха из камеры В в мембранный привод. Давление, действующее на мембрану привода, увеличивается. Последняя прогибается вверх и перемещает шток 1 позиционера. Перемещение штока преобразуется в усилие с помощью пружины 2. Сжатие пружины вызывает на мембранном блоке дополнительное усилие, которое прикрывает клапан 3 и уменьшает давление воздуха, подводимого к мембранному приводу. Равновесие наступает тогда, когда усилие пружины, а следовательно, и положение мембраны и штока мембранного привода станут соответствующими поданному входному давлению воздуха. Через камеру Б воздух выходит в атмосферу при уменьшении входного давления.

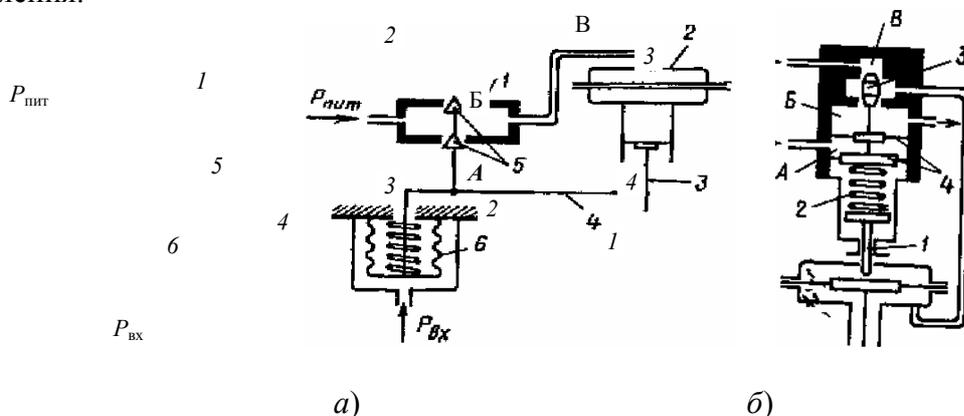


Рис. 11.3. Схемы пневматических позиционеров

Позиционеры, работающие по схеме компенсации перемещений, применяют в основном для мембранных приводов, имеющих большой ход штока (25...100 мм), а позиционеры, построенные по схеме компенсации сил, – для мембранных приводов, ход штока которых составляет 7...25 мм.

## 11.6. ПОРШНЕВОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Поршневой привод в отличие от мембранного позволяет получить большое перемещение штока, что в некоторых случаях определяет целесообразность его применения. Основные элементы поршневого привода (рис. 11.4) – поршень 3 и цилиндр 1, герметичность между трущимися поверхностями которых обеспечивается манжетой 2. Под действием входного давления на поршне развивается усилие, которое будет поступательно перемещать регулирующий орган.

Конструктивно поршневые приводы бывают одинарного и двойного действия.

В приводах одинарного действия воздух подводится к поршню только с одной стороны, а сила, развиваемая при этом поршнем, уравновешивается либо противодействием груза 4 (рис. 11.4, а), либо силой упругой деформации пружины 5 (рис. 11.4, б). В поршневых приводах двойного действия (рис. 11.4, в) перемещение поршня в противоположных направлениях осуществляется подачей давлений  $P_{вх1}$  и  $P_{вх2}$  в ту или другую полость цилиндра.

Выпускают поршневые приводы с внутренним диаметром цилиндра 30...300 мм. Для увеличения точности и уменьшения инерционности поршневых исполнительных механизмов их, как и мембранные, дополняют позиционерами. Такие поршневые приводы называют *следящими*.

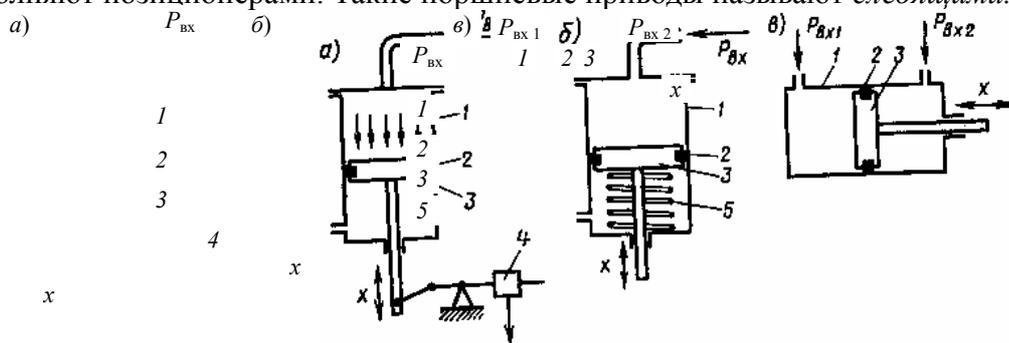


Рис. 11.4. Схемы поршневых приводов

На рис. 11.5 приведена схема поршневого следящего привода с мембранно-золотниковым позиционером. Привод состоит из цилиндра 5 и поршня 5, уплотнение между которыми обеспечивается кольцами 4.

С помощью пружины 7 осуществляется преобразование величины перемещения в силу и вводится отрицательная обратная связь по положению поршня.

Привод работает следующим образом. Давление  $P_{вх}$  поступает в камеру Б и деформирует мембрану 11 с жестким центром 10. Пропорциональность между давлением  $P_{вх}$  и деформацией мембраны достигается за счет пружины 12. При увеличении входного давления деформация мембраны увеличивается и золотник 2 передвигается влево. Воздух питания (обычно с давлением  $6 \cdot 10^5$  Па) из полости А поступает в канал 1, и поршень 8, а вместе с ним и шток 6 передвигаются вправо. При этом пружина 7 растягивается и усилие, воздействующее на мембрану со стороны этой пружины, увеличивается, т.е. осуществляется отрицательная обратная связь по положению поршня.

Движение поршня происходит до тех пор, пока он не займет положение, пропорциональное входному давлению. При уменьшении входного давления воздух поступает в линию питания 3.

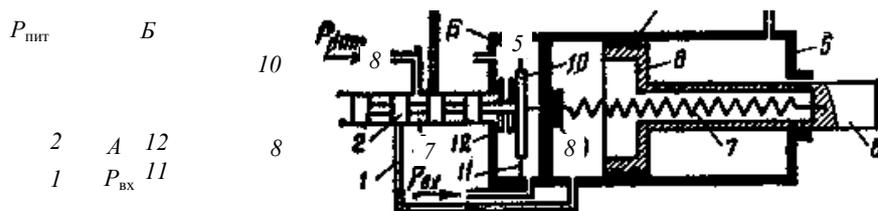
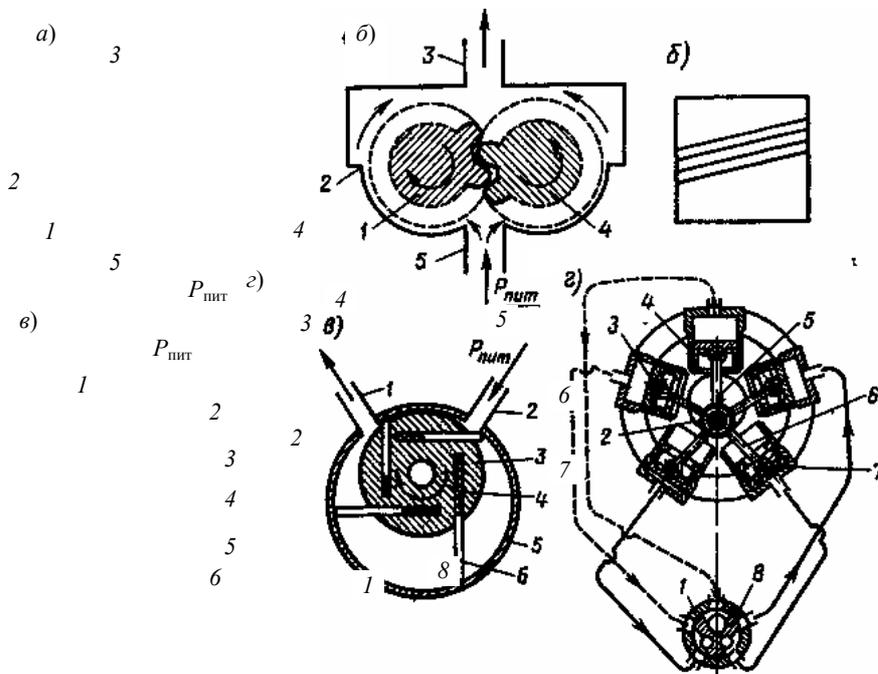


Рис. 11.5. Схема поршневого следящего пневмопривода  
11.7. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ  
ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Исполнительные механизмы вращательного движения используют пневматические двигатели для сообщения вращательного движения регулирующему органу.

На рис. 11.6, а показана схема шестеренчатого пневматического двигателя, состоящего из двух цилиндрических косозубых (рис. 11.6, б) шестерен и 4, размещенных в корпусе 2. В нижней части двигателя зазор между шестернями и стенкой корпуса выполняется минимальным. Воздух питания подается к двигателю через штуцер 5 и сбрасывается в атмосферу через штуцер 3. Вращение двигателя (направление вращения показано на чертеже стрелками) происходит под действием неуравновешенного давления, действующего на косые зубья двигателя. Подобные двигатели могут быть выполнены реверсивными. Двигатель может быть снабжен регулятором скорости вращения, который обычно представляет собой центробежный механизм, соединенный с заслонкой, перекрывающей линию воздуха питания двигателя.



**Рис. 11.6. Пневматические исполнительные механизмы вращательного движения**

На рис. 11.6, *в* представлена принципиальная схема пневматического лопастного двигателя. Ротор 3 расположен в камере 5 двигателя эксцентрично. В ротор вмонтированы лопасти 4, которые способны выдвигаться из него под действием пружин 2. Вал двигателя вращается под воздействием разности давлений, образующейся на каждой из лопастей за счет расширения газа. Воздух питания поступает в двигателе через штуцер 2 и сбрасывается в атмосферу через штуцер 1.

На рис. 11.6, *г* приведена схема поршневого пятицилиндрового пнев-модвигателя, поршни которого приводят во вращение коленчатый вал.

Силовые цилиндры 7 расположены под углом  $72^\circ$ . Их поршни 4 с помощью поршневых пальцев 3 и шатунов 6 связаны с кривошипом 5 основного вала 2 привода. На валу 2 расположен жестко связанный с ним распределитель 5, который вращается в неподвижной втулке 1. К этой втулке (на рисунке не показано) подводится воздух питания, а пять равномерно расположенных по окружности окон связаны каналами с соответствующими цилиндрами.

## 11.8. РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ

Регулирующие органы служат для изменения количества вещества, подводимого к объекту регулирования или отводимого от него. Они представляют собой различного рода клапаны, заслонки или шиберы, приводимые в движение приводами.

Чаще всего с помощью регулирующих органов изменяют расход вещества, подаваемого в объект регулирования. Изменение расхода среды при перемещении регулирующего органа из одного крайнего положения в другое называют диапазоном регулирования органа. Для обеспечения регулирующим органом управления процессом необходимо, чтобы диапазон регулирования его превышал те изменения расхода среды, которые могут иметь место при переходе от минимальной нагрузки к максимальной.

Действие регулирующего органа в пределах диапазона регулирования оценивается его статической характеристикой, т.е. зависимостью расхода среды от положения (степени открытия) регулирующего органа.

Различают теоретическую и рабочую статические характеристики. Теоретическая характеристика определяется при постоянном перепаде давления на регулирующем органе, а рабочая – при переменном перепаде, т.е. для реальных рабочих условий. Рабочая характеристика может отличаться от теоретической. Если последняя линейна, то рабочая характеристика может быть существенно нелинейной. Поэтому для получения линейной рабочей характеристики необходимо выбрать профиль регулирующего органа так, чтобы теоретическая характеристика была нелинейной. Регулирующие органы обычно выполняются с линейной, параболической или логарифмической теоретическими характеристиками.

Чаще других в качестве регулирующих органов используют клапаны (рис. 11.7, *а*). Регулирование расхода среды через клапан осуществляется за счет изменения проходного сечения между плунжером 1

и седлом 5. Поверхность, по которой соприкасаются плунжер и седло в закрытом положении, называют опорной поверхностью. Шток 4, перемещающийся под действием привода, выведен из корпуса 2 наружу через сальник 3.

Статическая характеристика клапанного регулирующего органа определяется формой и размерами плунжера и седла, которые могут быть различными (рис. 11.7, б–ж).

На рис. 11.7, б показан тарельчатый клапан с плоской опорной поверхностью. Проходное сечение его – цилиндрическая поверхность. Такие клапаны применяют редко, так как при больших скоростях протекания среды через них кромки тарелок быстро истираются, что приводит к изменению характеристик клапанов.

Тарельчатые клапаны с конической опорной поверхностью (рис. 11.7, в) используют для регулирования больших расходов. Проходным сечением у них служит кольцевая щель между внутренней кромкой плунжера и опорной поверхностью седла.

Игольчатые клапаны (рис. 11.7, г) применяют для сравнительно малых расходов среды и при значительных давлениях. Проходным сечением игольчатых клапанов служит коническая щель между внутренней кромкой седла и конической поверхностью плунжера.

Золотниковый клапан (рис. 11.7, д, е, ж) представляет собой полый цилиндр с прорезанными в его боковой стенке окнами. Величина проходного сечения клапана определяется суммарной площадью той части окон, которая выступает над кромкой седла. Окна могут быть прямоугольного (рис. 11.7, д), треугольного (рис. 11.7, е) или другого по форме (рис. 11.7, ж) сечения.

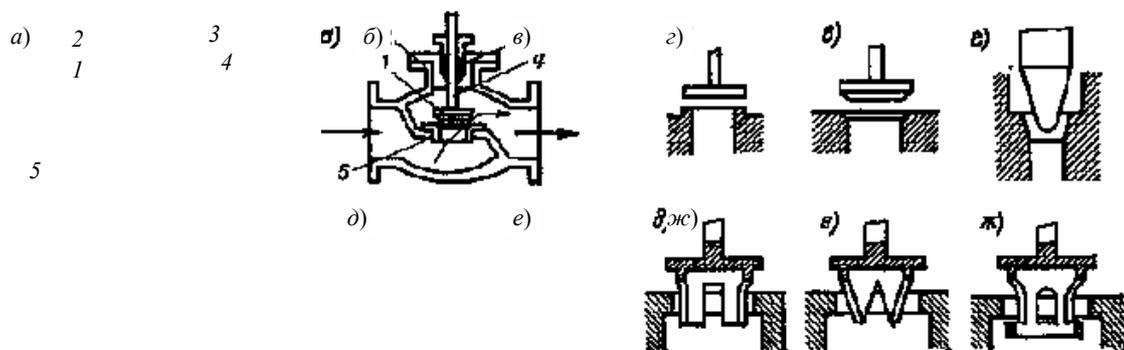
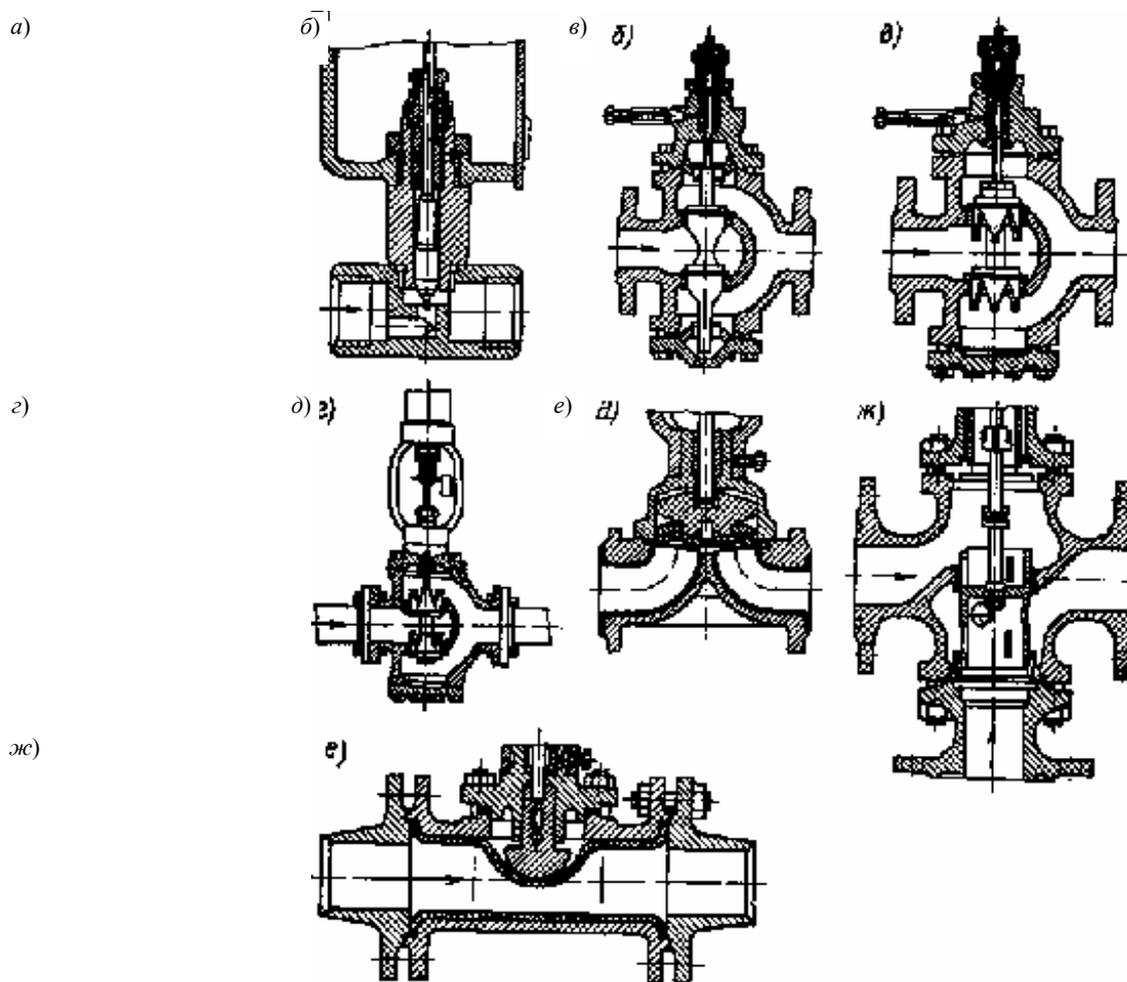


Рис. 11.7. Типы регулирующих клапанов



**Рис. 11.8. Конструкции регулирующих клапанов**

На рис. 11.8 представлены некоторые конструкции регулирующих органов. Они выполняются как односедельными, так и двухседельными.

Односедельные регулирующие органы (рис. 11.8, *a*) применяют для установки на трубопроводах малого диаметра и при небольших перепадах давлений на клапанах. Обычно регулирующие органы исполнительных механизмов выполняют двухседельными прямого (рис. 11.8, *б, в*) или обратного (рис. 11.8, *д*) действия. У регулирующих органов прямого действия при ходе штока вниз проходное сечение уменьшается, а у регулирующих органов обратного действия – увеличивается. Двухседельные клапаны позволяют значительно уменьшить усилие, оказываемое на шток регулирующего органа.

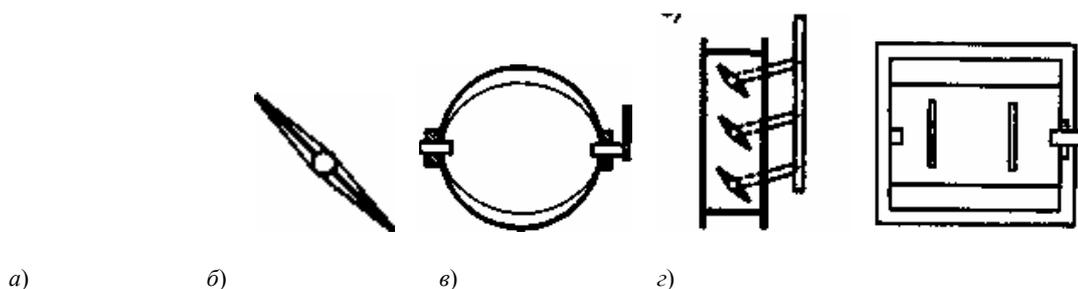
Кроме указанных регулирующих органов для регулирования расхода загрязненных и агрессивных сред применяют диафрагмовые (рис. 11.8, *д*) и шланговые (рис. 11.8, *е*) клапаны. В диафрагмовых клапанах проходное сечение перекрывается диафрагмой из специального материала, а в шланговых – сечение потока изменяется за счет деформации шланга, изготовленного из специального материала, стойкого к регулируемой среде.

В промышленности последнее время получают распространение трехходовые смесительные клапаны (рис. 11.8, *ж*). Преимущество их заключается в том, что при постоянном давлении потоков можно без применения специальных регуляторов соотношения поддерживать соотношение расходов двух смешиваемых потоков.

В системах регулирования при воздействии на потоки газа и пара находят применение также регулирующие заслонки. Они используются в трубопроводах большого диаметра при небольших избыточных давлениях, где допускаются небольшие потери давления. Заслонки могут работать в среде газов, содержащих твердые частицы, а также в среде сыпучих гранулированных твердых материалов. Изменение проходного сечения регулирующего органа достигается поворотом заслонки под действием пневмопривода.

На рис. 11.9 показаны некоторые типы заслонок. Круглые заслонки (рис. 11.9, *a*) устанавливают в трубопроводах, а прямоугольные (рис. 11.9, *б*) – в коробах и газоходах. Заслонки прямоугольного сечения могут выполняться однолопастными (рис. 11.9, *б*), многолопастными с разделительными перегородками (рис. 11.9, *в*) и многолопастными без разделительных перегородок (жалюзи) (рис. 11.9, *з*). Приме-

нение многолопастных заслонок позволяет значительно уменьшить усилие пневматического привода требуемое для управления заслонкой.



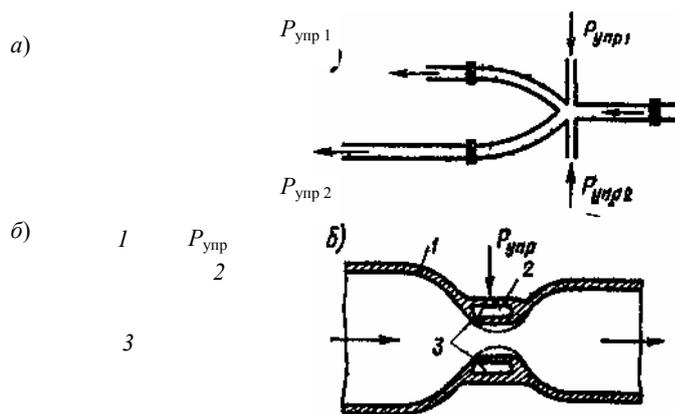
**Рис. 11.9. Типы поворотных заслонок**

При управлении многими технологическими процессами встречаются задачи регулирования расхода агрессивных или нагретых до нескольких тысяч градусов Цельсия газов и жидкостей, а также газов и жидкостей, содержащих механические частицы. Установка механических регулирующих органов (клапанов или заслонок) во многих таких случаях практически невозможна (или неэффективна), так как приводит к быстрому износу регулирующего органа и потере им регулирующей способности. Преодоление указанных трудностей оказалось возможным в некоторых случаях путем применения принципов струйной техники. Первоначально струйные методы были использованы для конструирования исполнительных устройств в ракетно-космической технике.

### 11.9. СТРУЙНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ВЕЩЕСТВ

В технологических процессах также могут быть применены принципы струйного управления потоками. На рис. 11.10, а показана схема струйного исполнительного механизма, предназначенного для управления расходом вещества в технологическом потоке. В каналы управления подается вещество, аналогичное веществу в технологическом потоке, или вещество, подача которого допустима из требований технологии процесса.

По такой схеме можно построить исполнительный струйный механизм, используя любой из рассмотренных ранее струйных принципов усиления пневматических сигналов. Однако недостаток всех этих исполнительных устройств в том, что они не могут регулировать расход вещества только через один канал, а это создает ряд технологических трудностей.



**Рис. 11.10. Струйные методы управления потоком вещества**

На рис. 11.10, б показана схема исполнительного струйного устройства, позволяющего регулировать расход вещества через один канал без слива или рециркуляции.

Устройство представляет собой сопло 1, устанавливаемое на технологическом потоке. В камеру 2 вводится поток управления, который, вытекая через кольцевой канал 3, воздействует на основной поток, протекающий через сопло, и поджимает его. Управляющий поток вводится в дозвуковую часть сопла. Возникающий при взаимодействии потоков эффект уменьшения площади критического сечения приводит к уменьшению суммарного расхода. Изменение же расхода результирующего потока пропорционально расходу управляющего потока.

## Вопросы для самостоятельной работы студентов

1. Дайте определение исполнительного устройства?
2. С какой целью используется исполнительное устройство в системах автоматического регулирования?
3. Что Вы понимаете под исполнительным механизмом?
4. Какую функцию выполняет исполнительный механизм в автоматических системах автоматического регулирования?
5. Какое устройство называют регулирующим органом?
6. Где устанавливается регулирующий орган?
7. Может ли функционировать система автоматического регулирования без регулирующего органа?
8. Какую функцию выполняет регулирующий орган?
9. Из каких блоков и субблоков состоит исполнительное устройство?
10. Классификация исполнительных устройств в зависимости от вида используемой энергии.
11. Классификация исполнительных устройств в зависимости от конструктивных особенностей регулирующего органа.
12. На что направлено действие перестановочного усилия, развиваемого исполнительным механизмом?
13. Конструктивные особенности мембранных приводов одинарного и двойного действия.
14. С какой целью устанавливают на исполнительные механизмы позиционеры?
15. Принцип действия пневматического позиционера, работающего по схеме компенсации перемещений.
16. Принцип действия пневматического позиционера, работающего по схеме компенсации сил.
17. Поршневые пневматические приводы одинарного и двойного действия.
18. Поршневой следящий привод с мембранно-золотниковым позиционером.
19. Особенности конструктивного выполнения исполнительных механизмов вращательного действия.
20. Регулирующие органы тарельчатого типа.
21. Конструкции односедельных и двухседельных регулирующих органов.
22. Достоинства и недостатки шланговых и диафрагмовых регулирующих органов.
23. Поворотные и шиберные заслонки. Сходство и различия.
24. Сущность струйных методов управления потоками веществ.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

---

---

1. Технические средства автоматизации химических производств: Справ. изд. / В.С. Балакирев, Л.А. Барский, А.В. Бугров и др. М.: Химия, 1991. 272 с.
2. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации: Номенклатурный каталог. М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1984. Ч. 1. 172 с.
3. ГСП. Методическое пособие для инженерно-технических работников / С.Я. Борисов, Г.И. Кавалеров, А.Б. Родов и др.; Под общ. ред. Г.И. Кавалерова. М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1981. 392 с.
4. Технические средства АСУ ТП: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.Б. Яковлева. М.: Высш. шк., 1989. 263 с.
5. Фудим Е.В. Пневматическая вычислительная техника. М.: Наука, 1973. 528 с.
6. Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1973. 360 с.
7. 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.
8. Балакирев В.С., Софиев А.Э. Применение средств пневмо-гидроавтоматики в химических производствах. М.: Химия, 1984. 192 с.
9. Ибрагимов И.А., Фарзани Н.Г., Илясов Л.В. Элементы и системы пневмоавтоматики. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985. 544 с.
10. Мордасов М.М., Мищенко С.В., Мордасов Д.М. Физические основы измерения плотности и поверхностного натяжения пневматическими методами: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1999. 76 с.

11. Мордасов М.М., Мордасов Д.М., Трофимов А.В. Пневматические элементы и узлы в устройствах контроля состава и свойств веществ: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. 88 с.
12. Кивилис С.С. Плотномеры. М.: Энергия, 1980. 279 с.
13. Беляев Г.Б., Кузищев В.Ф., Смирнов Н.И. Технические средства автоматизации в теплоэнергетике. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
14. Емельянов А.И., Емельянов В.А. Исполнительные устройства промышленных регуляторов. М.: Машиностроение, 1975. 224 с.

## 2.1. Сопоставление электрических и пневматических величин

Величины					
электрические			пневматические		
наименование величины	единица измерения	обозначение	наименование величины	единица измерения	обозначение
Ток	А	$I$	Расход	кг/с, м <sup>3</sup> /с	$G,$ $Q$
Напряжение	В	$U$	Перепад давления	Па	$\Delta P$
Проводимость	Ом <sup>-1</sup>	$1/R$	Проводимость	м·с	$\alpha$
Заряд	Кл	$q$	Заряд камеры	кг	$N$
Напряженность	В·м <sup>-1</sup>	$E$	Напряженность	Н/м <sup>-3</sup>	$E = \frac{dP}{dx}$
Емкость	Ф	$C$	Емкость	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{Н}}$	$C = \frac{dN}{dP}$
Индуктивность	Гн	$L$	Индуктивность	$\frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}^2}$	$L = \frac{\Delta P}{\frac{d^2 N}{dt^2}}$

### 3.1. Общий вид решений дифференциального уравнения второго порядка при нулевых начальных условиях

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

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