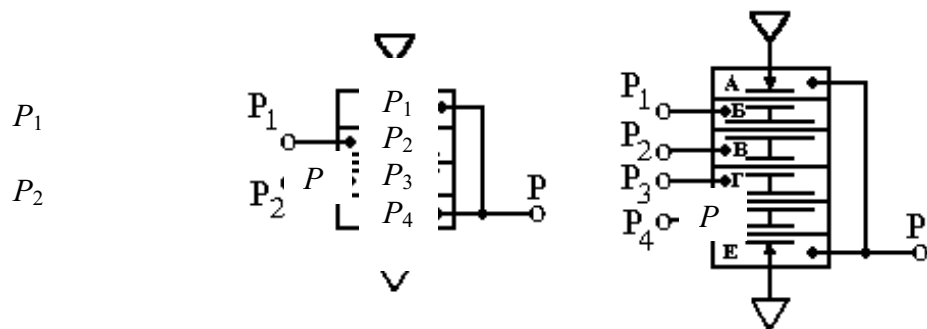
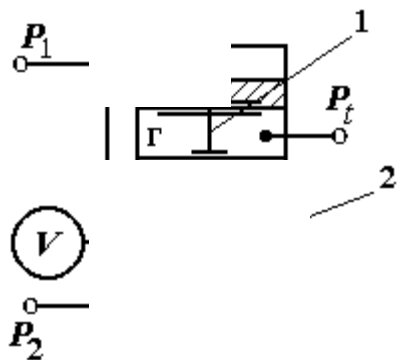


М. М. МОРДАСОВ, Д. М. МОРДАСОВ,  
А. В. ТРОФИМОВ

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ  
ЭЛЕМЕНТЫ И УЗЛЫ  
В УСТРОЙСТВАХ КОНТРОЛЯ  
СОСТАВА И СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ



• ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ •



Министерство образования Российской Федерации  
Тамбовский государственный технический университет

М. М. МОРДАСОВ, Д. М. МОРДАСОВ,  
А. В. ТРОФИМОВ

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УЗЛЫ  
В УСТРОЙСТВАХ КОНТРОЛЯ  
СОСТАВА И СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

Утверждено Ученым советом университета  
в качестве учебного пособия  
для студентов специальностей 210200, 072000

Тамбов  
• ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ •  
2001

УДК [62-522.7:005](07)  
ББК з 965-042.3 я 73  
М79

Рецензент  
Доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный работник высшей школы РФ  
*Д. А. Дмитриев*

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

М79 Пневматические элементы и узлы в устройствах контроля состава и свойств веществ: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. 88 с.  
ISBN 5-8265-0073-5

В учебном пособии рассматриваются пневматические элементы непрерывного и дискретного действия, а также преобразователи, относящиеся к унифицированной системе элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭПА). Приведены конструкции пневматических узлов (генераторы, импульсаторы, триггеры и др.), широко используемых в автоматических устройствах контроля физико-механических свойств веществ. Рассмотрены пути построения пневматических унифицированных элементов и узлов.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей 210200, 072000 и может быть полезно при изучении ими дисциплин "Технологические средства автоматизации", "Метрология", "Пробоотбор и провподготовка", "Методы и средства измерений, испытаний и контроля", а также при курсовом и дипломном проектировании, кроме того оно может быть использовано инженерами и техниками, занимающимися разработкой и эксплуатацией пневматических приборов контроля веществ.

УДК [62-522.7:005](07)

ББК з 965-042.3 я 73

ISBN 5-8265-0073-5



Тамбовский государственный  
технический университет (ТГТУ),  
2001

© Мордасов М. М., Мордасов Д. М.,  
Трофимов А. В., 2001

Учебное издание











МОРДАСОВ Михаил Михайлович,  
МОРДАСОВ Денис Михайлович,  
ТРОФИМОВ Алексей Владимирович

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

### В формулах

$d$ - диаметр, м;	$Sg(P_1 - P_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } P_1 > P_2, \\ 0, & \text{если } P_1 < P_2, \end{cases}$
$f$ - частота, Гц;	$t$ - время, с;
$F$ - сила, Н;	$T$ - абсолютная температура, К;
$g$ - ускорение свободного падения, $\text{м/с}^2$ ;	$V$ - объем, $\text{м}^3$ ;
$G$ - массовый расход газа, кг/с;	$W$ - скорость газовой выделений, кг/с;
$h$ - уровень, перемещение, м;	$\alpha, \beta$ - проводимость дросселей, м·с;
$l$ - длина, м;	$\Delta P$ - перепад давления, Па;
$M$ - масса газа, кг;	$\eta$ - вязкость, Па·с;
$P$ - давление, Па;	$\rho$ - плотность, $\text{кг/м}^3$ ;
$P_t$ - давление управления, Па;	$\tau$ - постоянная времени, время задержки, с.
$R$ - газовая постоянная, Дж/(кг·К);	
$S$ - площадь, $\text{м}^2$ ;	

### На рисунках

	- питание сжатым воздухом, $P_{\text{пит}} = 0,140 \pm 0,014$ МПа;
	- связь с атмосферой;
	- штуцер для подвода давления;
	- пневмемкость;
	- постоянный дроссель;
	- переменный дроссель;
	- преобразователи "сопло-заслонка";
	- малый подпор, $P_{\text{под}} = (0,3 \dots 0,4) P_{\text{пит}}$ ;
	- большой подпор, $P_{\text{под}} = (0,7 \dots 0,8) P_{\text{пит}}$ ;
	- пружина.

## ВВЕДЕНИЕ

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 вышеперечисленному, однако пневматические приборы более полно отвечают этим требованиям. Пневмоавтоматика является одним из основных средств автоматизации производственных процессов.

*Пневмоавтоматика* - область технической кибернетики, охватывающая принципы и средства построения элементов, приборов и систем автоматического контроля и управления, использующих в работе различные эффекты газовой динамики [1].

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

Разработка пневматических методов и приборов контроля веществ значительно ускорила 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 контроля состава и свойств веществ, но и при необходимости разрабатывать принципиально новые средства измерения.

Изучив конструкции и принципы действия элементов и узлов пневмоавтоматики, студенты приступают к изучению оригинальных устройств контроля состава и свойств веществ. Именно такое представление материала в пособии, по мнению авторов,

способствует лучшему усвоению представленной информации и выработки навыков анализа устройств контроля веществ.

В первой главе приведено описание конструкций и принципов действия основных пневматических элементов: сопротивление, элементов сравнения, повторителей, задатчиков давления, реле, преобразователей и других.

Во второй главе описаны конструкции и принципы действия основных узлов пневмоавтоматики таких, как камера, запоминания сигналов, импульсаторов, генераторов, триггеров, пульсирующих пневматических сопротивлений.

В третьей главе показана возможность применения элементов и узлов пневмоавтоматики при построении блоков преобразования информации в устройствах контроля вязкости газа, скорости и количества выделяющихся газов, плотности и вязкости жидкости.

В четвертой главе на конкретных примерах рассмотрены особенности анализа различных пневматических устройств с количественной оценкой статических и динамических свойств.

Приведенные в приложениях сведения позволяют повысить практическую направленность книги.

Терминология, принятая в книге, соответствует ГОСТ 16263-70 и 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.

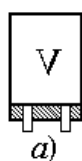
## 1 КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

### 1.1 Элементы непрерывного действия

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

**Пневмоемкости** предназначены для накопления сжатого воздуха. Основной характеристикой их служит постоянный или переменный объем  $V$ . Емкость с постоянным объемом показана на рис. 1.1, *а*, условное обозначение емкости в схемах пневматических средств автоматизации изображено на рис. 1.1, *б*. Постоянная емкость представляет собой полый жесткий цилиндр, ограничивающий объем  $V$ , а регулируемая емкость содержит сильфон, объем  $V$  которого изменяется вручную.

#### **Пневматические**



*а)*



*б)*

**сопротивления (ПС)** применяют для создания местного сопротивления потоку воздуха и изменения его расхода  $G$ . Пневмосопротивления разделяют на постоянные.

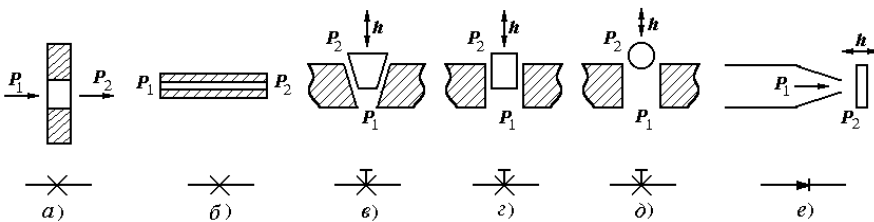
**Рис. 1.1** Схема емкости постоянного объема (а) и ее условное обозначение (б)

разделяют на постоянные, регулируемые вручную и переменные. В постоянных ПС типа жиклер и капилляр (рис. 1.2, а, б) площадь  $F$  проходного сечения неизменна. В УСЭППА 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. 2, в, г, д, е) площадь  $F$  изменяют вручную или каким-либо техническим устройством. Статические характеристики пневмосопротивлений  $G = f(P_1, P_2, F)$  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 линеаризация справедлива для пневматических сопротивлений с ламинарным режимом течения газа при  $\Delta P \leq (20 - 30)$  кПа, для остальных -  $\Delta P \leq (10 - 20)$  кПа.

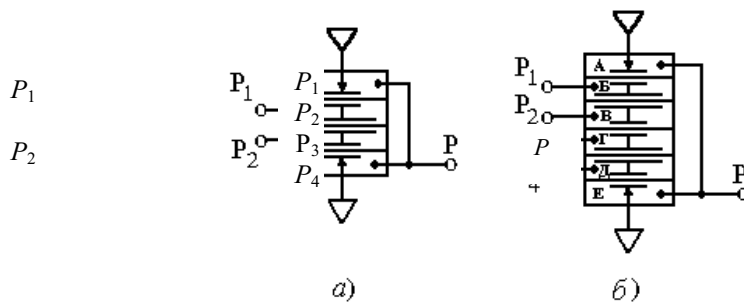
Двух- и четырехходовые усилители давления УСЭППА называют *элементами сравнения*. Схема операционного усилителя с двумя входами представлена на рис. 1.3, а. Этот усилитель имеет три мембраны.

На рис. 1.3, 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 следующем виде:



**Рис. 1.2** Схемы пневматических сопротивлений и условные обозначения:

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



**Рис. 1.3** Схемы усилителей давления:

а - двухвходовой П2ЭС.3; б - четырехвходовой П2ЭС.1

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

Функция  $S_g(P_1 - P_2)$  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

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

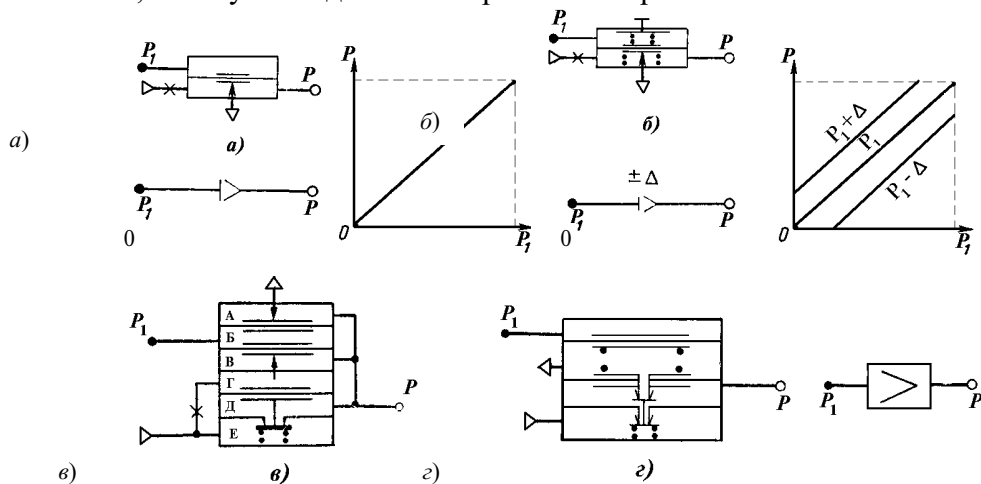
Элементы сравнения используют для построения сумматоров двух, трех или четырех давлений. Для этого в камеру Д четырехходового усилителя (рис. 1.3, б) вводят сигнал отрицательной обратной связи из камеры Е. В этом случае равновесие мембранного сумматора сил возможно на линейном участке статической характеристики. На этом усилителе можно выполнять разные операции: при  $P_1 = P_Б = P_Г$  имеем  $P_{\text{ВЫХ}} = 2P_1 - P_2$ ; при  $P_3 = P_Г = P$  получим  $P_{\text{ВЫХ}} = P_1 - P_2$ ; при  $P_2 = P_Б = 0$  имеем  $P_{\text{ВЫХ}} = P_1 + P_3$ ; при  $P_Б = P_Д = P$  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. 1.4. Промышленно выпускаются четыре элемента УСЭППА: два маломощных повторителя П2П.1М (рис. 1.4, а), служащий для формирования маломощного выходного сигнала, равного входному, и П2П.2М (рис. 1.4, 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. 1.4, в) осуществляет точное повторение сигнала с усилением по мощности (класс точности 0,5), другой П2П.3 (рис. 1.4, г) является усилителем мощности низкой точности (без класса).

Повторитель, схема которого дана на рис. 1.4, а, осуществляет повторение с погрешностью, не превышающей 0,5 %. У второго повторителя (рис. 1.4, 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. Причем, знак плюс относится к случаю, когда равнодействующая сил двух пружин направлена вниз, а минус - когда сила направлена вверх.



**Рис. 1.4** Схемы пневматических повторителей:

а - маломощный точный повторитель;

б - маломощный точный повторитель со сдвигом;



$\epsilon$  - повторитель-усилитель мощности высокой точности;

$\zeta$  - повторитель-усилитель мощности низкой точности

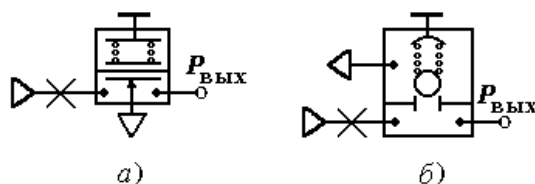
Низкий уровень выходной мощности таких повторителей обусловлен тем, что выходное давление  $P_{\text{ВЫХ}}$  забирается из междроссельной камеры пневматического усилителя сопло-заслонка, имеющего постоянный дроссель с большим сопротивлением. Эти повторители предназначены для работы на внутрисхемных коммуникациях и их выходные давления продаются 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. 4,  $\epsilon$ ), грубого усилителя мощности (камеры Г, Д, Е) и канала отрицательной обратной связи по давлению.

Грубый повторитель (рис. 1.4,  $\zeta$ ) 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.

Усилители мощности устанавливают на выходе пневматических приборов и регуляторов.

Для формирования пневматических сигналов определенного уровня в пневматических приборах используют *задатчики* давления. Их строят на базе дроссельных делителей, один из вводов которого соединен с источником питания, а другой - с атмосферой; точного маломощного повторителя со сдвигом (рис. 1.4,  $\delta$ ) и проточной камеры с регулируемым ПС типа шарик-цилиндр (рис. 1.2,  $\delta$ ). В УСЭППА входят задатчик П23Д.3 (рис. 1.5,  $\delta$ ) устанавливаемый перед глухими камерами, и мощный задатчик П23Д.4 с дополнительным усилителем мощности.



**Рис. 1.5** Схемы задатчиков давления:

$a$  - маломощный мембранного типа;  $b$  - типа П23Д.3

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

## 1.2 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 от 0,08 МПа до 0,14 МПа. Эти два уровня сигналов используют в качестве значений логических переменных.

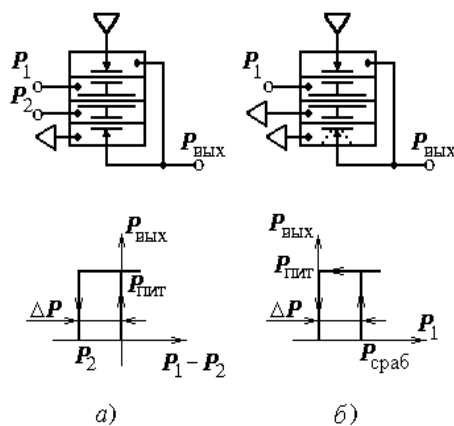
Основным элементом устройств дискретного действия является *пневматическое реле* (рис. 1.6,  $a$ ), схема которого аналогична схеме элемента сравнения. Однако их конструкции различны: пневматические реле имеют меньшие габаритные размеры, так как чувствительность его не должна быть такой высокой, как у элемента сравнения. В конструкции пневмореле отсутствует регулировка сопел, тонкие мембраны заменены на более толстые, заслонка делается неметаллической, размер отверстия в соплах увеличен. Габаритные размеры пневмореле 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 сопел, 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. 1.6, а) и П1Р.3 (рис. 1.6, 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. 1.6, 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  $P_{пит}$ .

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.



**Рис. 1.6** Схемы и статические характеристики пневматических реле: а - со смещением; б - без смещения

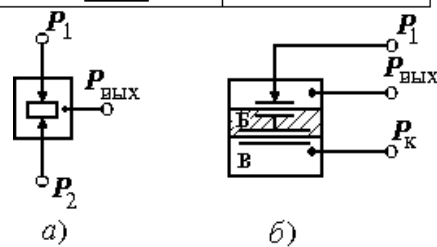
Петлеобразная статическая характеристика реле, отвечающая приведенным выше рассуждениям, показана на рис. 1,б, а, причем  $\Delta P = P_{\text{пит}} \frac{S_1}{S_2 - S_1}$ .

Реализация логических функций с использованием пневматического реле приведена в табл. 1.1 [4].

### 1.1 Реализация логических функций с использованием пневматического реле ППР.1

Функция и ее символическая запись	$P_1$	0	1	0	1	Схема	Условные обозначения
	$P_2$	0	0	1	1		
Отрицание (НЕ)	$P_{\text{ВЫХ}} = \bar{P}_1$	1	0	1	0		
Повторение (ДА)	$P_{\text{ВЫХ}} = P_1$	0	1	0	1		
Конъюнкция (И)	$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 \wedge P_2$	0	0	0	1		
Дизъюнкция (ИЛИ)	$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 \vee P_2$	0	1	1	1		
Импликация (ЕСЛИ-ТО)	$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 \rightarrow P_2$	1	0	1	1		
Запрет (обратная импликация)	$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 \leftarrow P_2$	0	1	0	0		

Для коммутации пневматических сигналов и реализации простейших логических операций также применяют *пневматические клапаны* (рис. 1.7). Пневмоконтакт принято считать замкнутым, если у



него заслонка удалена от сопла и пневматическая цепь не прервана. Пневмоконтакт разомкнут, если заслонка полностью прикрывает сопло и пневматическая цепь прервана. Пневматический клапан ПЗК.5 реализует функцию дизъюнкции двух переменных  $P_1$  и  $P_2$

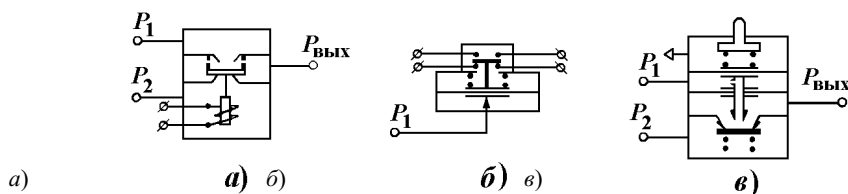
(рис. 1.8, *а*). В одноконтakтном клапане ПЗК.1 (рис. 1.7, *б*) применяют давление подпора, создаваемое в камере Б (или В) и командный сигнал  $P_k$ , вводимый в камеру В (или Б). При  $P_k = 1$  сигнал  $P_1$  не проходит на выход; если  $P_k = 0$ , то  $P_{\text{вых}} = P_1$ .

**Рис. 1.7 Схемы пневматических клапанов:**  
*а* - безмембранный типа ПЗК.5;  
*б* - одноконтakтный клапан ПЗК.1

### 1.3 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. 1.8, *а*) состоит из двухконтakтного клапана и электромагнита, якорь которого связан с заслонкой. Пневмоэлектрический преобразователь (рис. 1.8, *б*) выполняется в виде комбинации одномембранного клапана и микропереключателя, контакт которого жестко связан с мембраной. Механопневматический дискретный преобразователь (конечный выключатель) (рис. 1.8, *в*), представляет собой сочетание двухконтakтного узла и механического толкателя.



**Рис. 1.8 Схемы преобразователей:**  
*а* - электропневматический; *б* - пневмоэлектрический; *в* - механопневматический

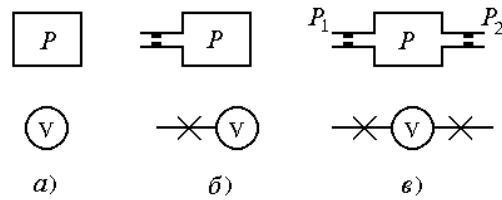
Технические характеристики комплекса элементов универсальной системы элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА) приведены в прил. 4.

## 2 ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ

### 2.1 Пневматические камеры

Соединение емкости объемом  $V$  и одного или нескольких ПС получило название **пневматической камеры**. Пневмокамера является специально организованным инерционным звеном, предназначенным для накопления сжатого воздуха и изменения его давления во времени по определенному закону. 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).

Различают изолированные камеры, глухие с одним входом и проточные камеры, у которых два и более ввода (рис. 2.1).



**Рис. 2.1** Схемы и условные обозначения пневматических камер:  
*а* - изолированной; *б* - глухой; *в* - проточной

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  $k_1, k_2, \dots, k_m$ . Давление в камере сумматора

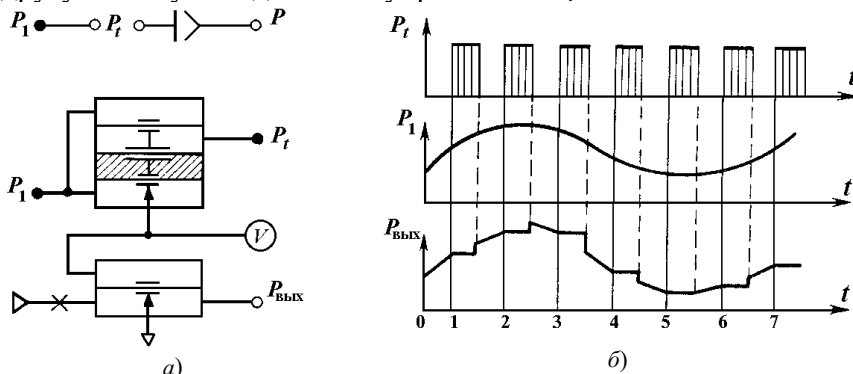
$$P = \sum_j k_j P_j, \quad j = 1, m,$$

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

## 2.2 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.

**Устройство запоминания непрерывных пневматических сигналов.** В УСЭППА существует элемент памяти непрерывный П2ЭП.1, представляющий собой комбинацию двух элементов: пневмоклапана и повторителя (рис. 2.2, *а*). В качестве клапана используют трехмембранное реле, в одну из камер которого подается постоянное давление подпора, а в другую поступает давление управления  $P_t$ .



**Рис. 2.2** Устройство для запоминания непрерывных пневматических сигналов *а*) и временная диаграмма его работы *б*)

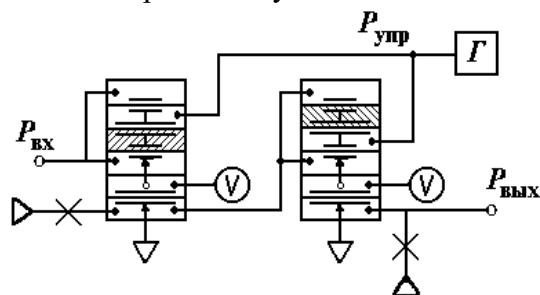
Рассмотрим работу устройства памяти, когда управление им осуществляется с помощью прямоугольных импульсов, поступающих от генератора. Если на вход устройства памяти поступает непрерывный пневматический сигнал  $P_1$ , то такое устройство при подаче на него давления управления  $P_t$  запомнит текущую величину пневматического сигнала, так как пневмоемкость  $V$  отключается от входной линии. Давление в пневмоемкости, 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. 2.2, *а*) при постоянной частоте следования импульсов  $P_t$  и при непрерывном изменении входного сигнала  $P_1$  показана на рис. 2.2, *б*.

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

Устройство задержки состоит из двух последовательно включенных элементов памяти П2ЭП.1, сигнал управления  $P_{упр}$  в которых подается в различные камеры соответствующих пневмореле (рис. 2.3).

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



**Рис. 2.3** Устройство задержки пневматического сигнала

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 ступенями, 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.

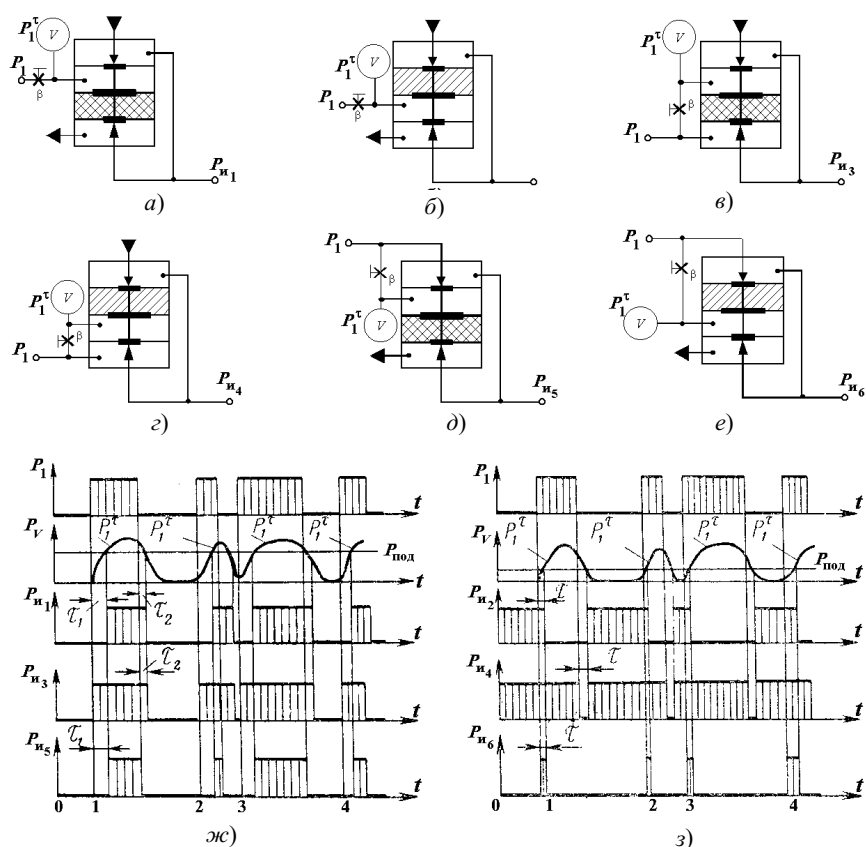
### 2.3 Импульсаторы

**Импульсаторы** используют для деформации пневматических дискретных сигналов: смещения, затягивания, укорачивания по фронту и срезу и т.д. Рассмотрим простейшие импульсаторы, которые выполняются на одном пневмореле с включением на вход в какую-

либо одну из его глухих камер инерционного звена, с помощью которого осуществляется естественная задержка сигнала во времени.

На рис. 2.4 приведены шесть схем импульсаторов, которые в зависимости от реализуемой пневмореле с подпором логической операции видоизменяют входной сигнал. Если пневмореле включено полуактивным способом (отсутствует питание), необходима развязка сигнала, идущего в глухую камеру и на сопло с помощью пневмореле, 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 пневмореле. Графики, изображенные на рис. 2.4, жс 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. 2.4, а и б пневмореле включены по одновходовой схеме сигнала  $P_1^r$ , задержанного на время  $\tau$ .



**Рис. 2.4 Схемы простейших импульсаторов и временные диаграммы их работы**

На рис. 2.4, 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  $\tau$ .

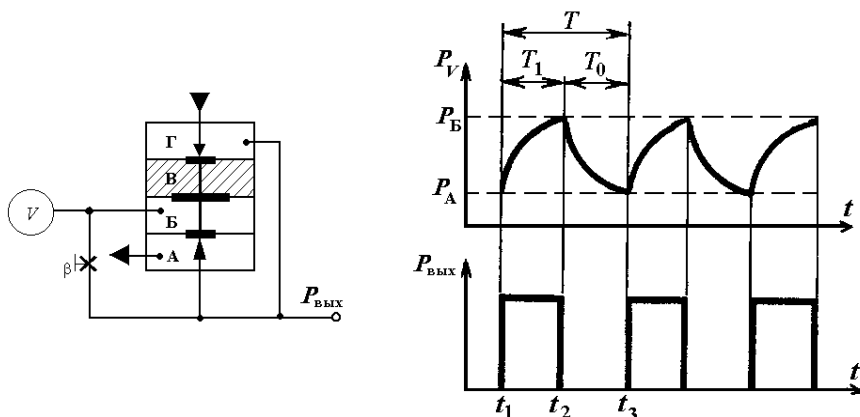
Сложные импульсаторы можно построить с использованием логических операций: штрих Шеффера, стрелка Пирса, равнозначность и неравнозначность.

## 2.4 Генераторы

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

Простейший генератор выполняют на пневмореле (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. Схема и график

работы такого генератора приведены на рис. 2.5. Длительность  $T$  тактов 1, 2, ...  $n$  определяется величиной инерционности, управляемой при  $V = \text{const}$  проводимостью  $\beta$  пневмосопротивления.



**Рис. 2.5** Схема и график работы пневматического генератора прямоугольных импульсов

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.

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.

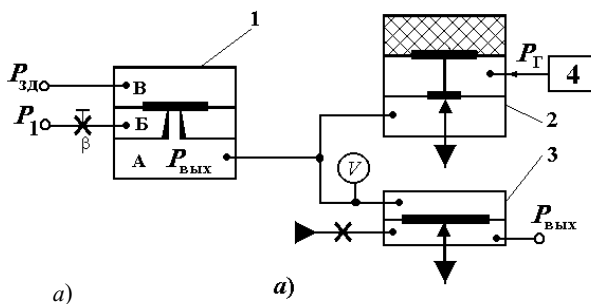
**Генератор непрерывно и линейно нарастающих давлений** (рис. 2.6, а) состоит из емкости  $V$ , сопротивления  $R$ , повторителя 3, управляемого пневматического клапана 2, генератора прямоугольных колебаний 4 и устройства 1, осуществляющего автоматически поддержание постоянного перепада давления на сопротивлении  $R$ .

Работа генератора линейно нарастающего давления происходит следующим образом.

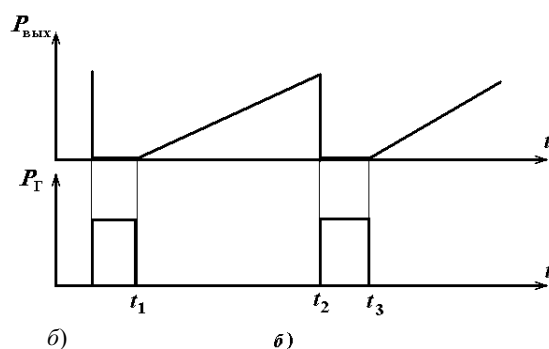
В момент времени  $t_1$  (рис. 2.6, б), когда сигнал прямоугольных колебаний  $P_\Gamma$  от генератора становится равным нулю, клапан 2 изолирует емкость  $V$  от атмосферы и в ней начинает линейно нарастать давление до момента времени  $t_2$ . Давление в емкости повторяется с помощью повторителя 3.

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 заново.







**Рис. 2.6 Пневматический генератор непрерывно нарастающего давления:**

*a* - 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.

## 2.5 Триггер с отдельными входами

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

*Триггером* с отдельными 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 очередном 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 отдельными 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 отдельными входами пневматическое трехмембранное реле с пружиной, то можно устранить указанное явление. Схема такого триггера показана на рис. 2.7.

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  $P_2 = 1$ .

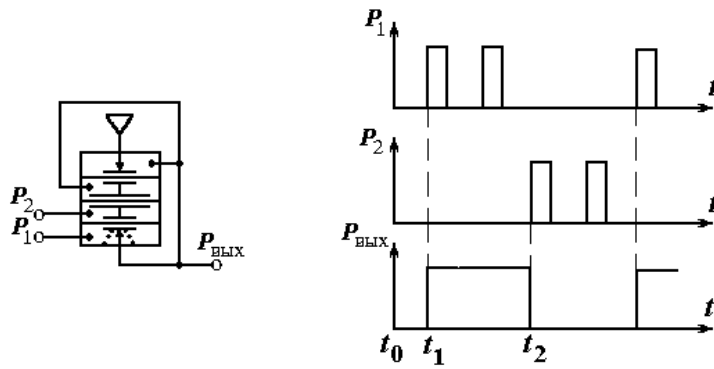


Рис. 2.7 Мембранный триггер с отдельными входами

## 2.6 Пневматические линейные пульсирующие сопротивления

*Пульсирующий дроссель* оформляется конструктивно как самостоятельный элемент - линейное пневмосопротивление. 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 УСЭПА.

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

Принципиальная схема пульсирующего сопротивления представлена на рис. 2.8, 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

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

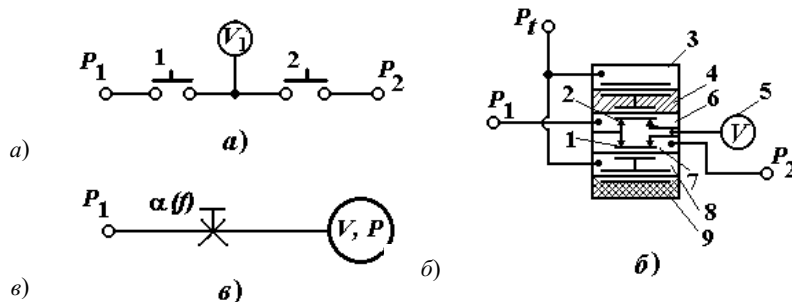


Рис. 2.8 Пневматическое линейное пульсирующее сопротивление ПС:

а - принципиальная схема ПС; б - конструктивная схема ПС;  
в - схема апериодического звена с ПС

Таким образом, в результате одного замыкания каждого из контактов в выходную линию из входной (при \$P\_1 > P\_2\$) перетечет масса газа

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

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

$$M = n \cdot \Delta M = \frac{V_1 n}{RT}(m_1 - m_2). \quad (2.1)$$

Продифференцируем равенство (2.1) по времени, предполагая, что  $P_1$  и  $P_2$  в каждом импульсе остаются постоянными:

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

здесь  $G$  - массовый расход газа, а  $\frac{dn}{dt}$  - 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.

Конструктивная схема пульсирующего сопротивления представлена на рис. 2.8, 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 апериодического звена с пульсирующим сопротивлением представлена на рис. 2.8, в. Масса воздуха в объеме  $V$  будет

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

а расход в этот объем

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

Тем обстоятельством, что объем пульсирующего дросселя суммируется с объемом апериодического звена, мы пренебрегаем. С другой стороны, из уравнения для пульсирующего дросселя (2.1) следует, что

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

Приравнивая расходы, получим

$$N \frac{dP}{dn} + P = P_1, \quad (2.2)$$

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 (2.2) будет

$$\bar{P} = P_1 \left( 1 - e^{-\frac{n}{N}} \right).$$

Процессы, происходящие в рассмотренном ППС, справедливы и для других конструкций.

На рис. 2.9 изображено пульсирующее пневматическое сопротивление с одним приводом и упругими соплами.

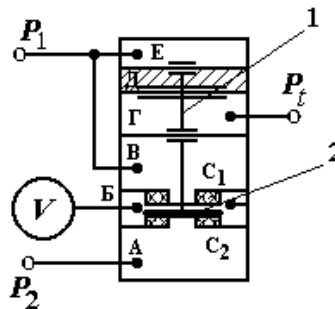


РИС. 2.9 СХЕМА ПУЛЬСИРУЮЩЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ С УПРУГИМИ СОПЛАМИ

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 по давлению, 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 возрастает до  $\alpha_{\max}$  проводимость одного из

контактов. Таким образом, для замыкания контактов необходимо преодолеть перепад  $\Delta_3=c(h_3-h_0)$ , где  $(h_3-h_0)$  - зазор, обеспечивающий проводимость замкнутого контакта.

Если упругие элементы при нейтральном положении привода не деформированы, то схема не устраняет сквозного протока (короткого замыкания).

ППС содержит трехмембранный привод, аналогичный мембранному блоку трехмембранную реле ПР.1, шток 1 которого соединен с заслонкой 2, расположенной между двумя 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  $A_0$  к камере Б присоединена емкость  $V$ .

Тактовые импульсы давления  $P_1$  поступают в камеру Г. В камеру Д подают давление подпора. При  $P_1=0$  под действием подпора сопло  $C_2$  закрыто, а емкость  $V$  через открытое сопло  $C_1$  соединена с входом  $P_1$ , 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. 2.10.

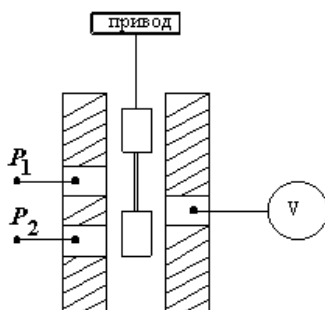


РИС. 2.10 ПУЛЬСИРУЮЩЕЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ  
ЗОЛОТНИКОВОГО ТИПА

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.

В рассматриваемых в главе 3 конструкциях устройств, для измерения свойств веществ используются различные схемы ППС. При этом, хотелось бы отметить, что выбор той или иной схемы ППС не является принципиальным.

### 3 ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

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) [4, 5], 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).

### 3.1 Устройство для измерения вязкости газов

При измерении вязкости как газов, так 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:

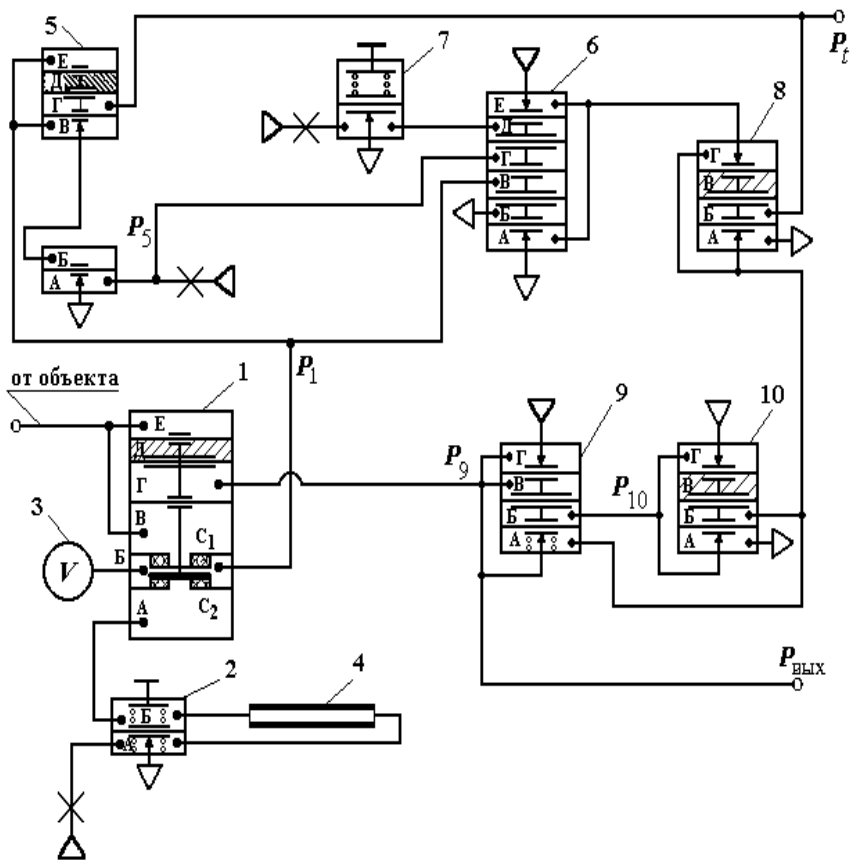
- по перепаду давления  $\Delta P$  на сопротивлении при постоянном расходе вещества через него;
- по величине расхода вещества через ламинарное сопротивление при постоянном перепаде давления  $\Delta P$  на нем;
- по времени истечения заданного количества вещества при постоянном перепаде давления  $\Delta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

Рассмотрим *устройство для измерения вязкости газа* по времени истечения заданного его количества при постоянном перепаде давления на капиллярной трубке истечения.

Наиболее сложно проводить измерения непосредственно в производственных условиях. В этом случае блок управления, выполненный из элементов УСЭППА, должен обеспечить автоматическое выполнение таких операций как

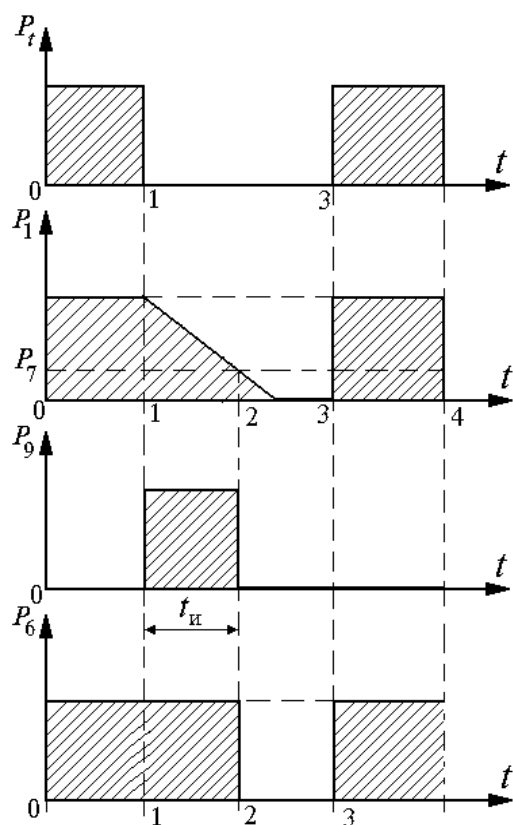
- отбор пробы газа;
- поддержание постоянным перепада давления на капиллярной трубке истечения;
- фиксацию выходной величины в виде интервала времени, однозначно определяющего вязкость контролируемого газа.

На рис. 3.1 представлена принципиальная пневматическая схема устройства для измерения вязкости газа; на рис. 3.2 приведена временная диаграмма его работы.



**Рис. 3.1 Принципиальная пневматическая схема устройства для контроля вязкости газа**

Устройство для измерения вязкости газа содержит пульсирующее сопротивление 1, к камере  $A_1$  которого подключена камера  $B_2$  точного повторителя со сдвигом 2. К камере  $B_1$  подключена дозирующая емкость 3. Камера  $B_2$  точного повторителя со сдвигом через трубку истечения 4 (ламинарный дроссель) соединена с камерой  $A_2$ . Камера  $B_1$  пульсирующего сопротивления 1 подключена к камерам  $B_5$  и  $E_5$  узла 5 памяти и к камере  $B_6$  пятимембранного элемента 6 сравнения, камера  $\Gamma_6$  которого соединена с выходом узла 5 памяти, а камера  $D_6$  соединена с выходом задатчика 7 давления. Выход элемента 6 сравнения подключен в сопло  $C$  реле 8, реализующего логическую функцию "Запрет", выход которого подключен к одному из входов триггера с отдельными входами 9 и ко входу реле 10, реализующего логическую функцию "Отрицание", выход которого подключен к другому входу триггера 9. Выход триггера 9 подключен в камеру  $\Gamma_1$  управления пульсирующего сопротивления 1 и к входу регистратора времени истечения (не показан).



**Рис. 3.2** Временная диаграмма работы пневматического устройства для измерения вязкости газа

Линия с анализируемым веществом подключена к камерам В<sub>1</sub> и Е<sub>1</sub> пульсирующего сопротивления 1. В камеры Д<sub>1</sub>, Д<sub>5</sub>, В<sub>8</sub> и В<sub>10</sub> соответствующих элементов схемы подано давление подпора. В камеры Г<sub>5</sub> и Б<sub>8</sub> подаются сигналы командного давления  $P_t$ .

Устройство работает следующим образом. При подаче командного давления  $P_t = 1$  камера В<sub>5</sub> узла памяти 5 сообщается с камерой В<sub>6</sub> пятимембранного элемента сравнения 6 и камерой Б<sub>1</sub> пульсирующего пневматического сопротивления 1. При этом с выхода узла памяти 5 давление  $P_5$  поступает в камеру Г<sub>6</sub> пятимембранного элемента сравнения 6, который при подаче на его входы давлений будет иметь на своем выходе  $P_6 = 0$ , если  $P_5 - P_1 > P_7$  или 1, если  $P_5 - P_1 < P_7$ , где  $P_1$ ,  $P_5$ ,  $P_7$  - давления на выходах элементов 1, 5 и 7, соответственно.

При  $P_t = 1$ ,  $P_5 = P_1$  и  $P_4 = 1$ , при этом сопло С пневматического трехмембранного реле 8 закрыто и на выходе реле 8 давление  $P_6 = 0$ .

В камеру А<sub>9</sub> триггера с отдельными входами 9 поступает давление  $P_8 = 0$ , а в камеру Б<sub>9</sub> 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 Г<sub>1</sub> пульсирующего сопротивления, мембранный блок под действием подпора, поданного в камеру Д<sub>1</sub>, перемещается вниз, соединяя камеры В<sub>1</sub> и Е<sub>1</sub> через открытое сопло С<sub>2</sub> пульсирующего сопротивления 1 с камерой Б<sub>1</sub>. Камеры В<sub>1</sub> и Е<sub>1</sub> при этом соединены, например с трубопроводом или другим источником анализируемого газа.

Процесс измерения начинается от входной линии а, следовательно, и давление в камере б сохраняется неизменным до тех пор, пока не сменится команда. На выходе элемента сравнения 6 давление  $P_6 = 1$ , которое через открытое сопло С<sub>1</sub> пневмореле 10 поступает в камеру А<sub>9</sub> 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 Г<sub>1</sub> пульсирующего сопротивления 1, сопло С<sub>1</sub> пульсирующего сопротивления 1 закрывается, а сопло С<sub>2</sub> 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 истечения 4, выполненной в виде ламинарного дросселя.

Состояние газа в дозирующей емкости 3 описывается уравнением

$$P_3 V = M R T, \quad (3.1)$$

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

$$(P_1 - P_7)V = (M - G t_{и})RT, \quad (3.2)$$

где  $G$  - расход газа по трубке истечения;  $t_{и}$  - время истечения.

Вычитая из (3.1) уравнение (3.2), получаем

$$P_7 V = G R T t_{и}, \quad (3.3)$$

откуда

$$t_{и} = (P_7 V)/(G R T). \quad (3.4)$$

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

$$G = \frac{\pi d^4 \Delta P \rho}{128 \cdot l \cdot \eta}, \quad (3.5)$$

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 (3.5) в (3.4) получаем

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

После того, как  $P_5 - P_1 = P_7$  на выходе пятимембранного элемента сравнения 6 будет сигнал  $P_6 = 1$ . Этим сигналом, прошедшим через сопло и 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 со входом. Подачей командного импульса  $P_t = 1$ , осуществляется подготовка регистрирующего устройства к работе.

В дальнейшем работа устройства осуществляется аналогично.

Предлагаемое устройство для измерения вязкости газов обладает по сравнению с известными следующими преимуществами: истечение газа происходит при постоянном перепаде давления на трубке истечения, кроме того величина перепада давления может быть

легко изменена посредством соответствующей настройки точного повторителя со сдвигом, результат измерения не зависит от колебаний давления во входном трубопроводе; высокая надежность работы в пожаро- и взрывоопасных условиях.

### 3.2 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. 3.3) 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 сравнения 5 и в камеру Б элемента сравнения 6. В камеру Б элемента 5 и в камеру А элемента подключены 6 соответственно датчики 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.

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 и чувствительный элементы 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  $F_v$ , равная

$$F_v = V_{из} \cdot (\rho_{ж} - \rho_{г})g ,$$

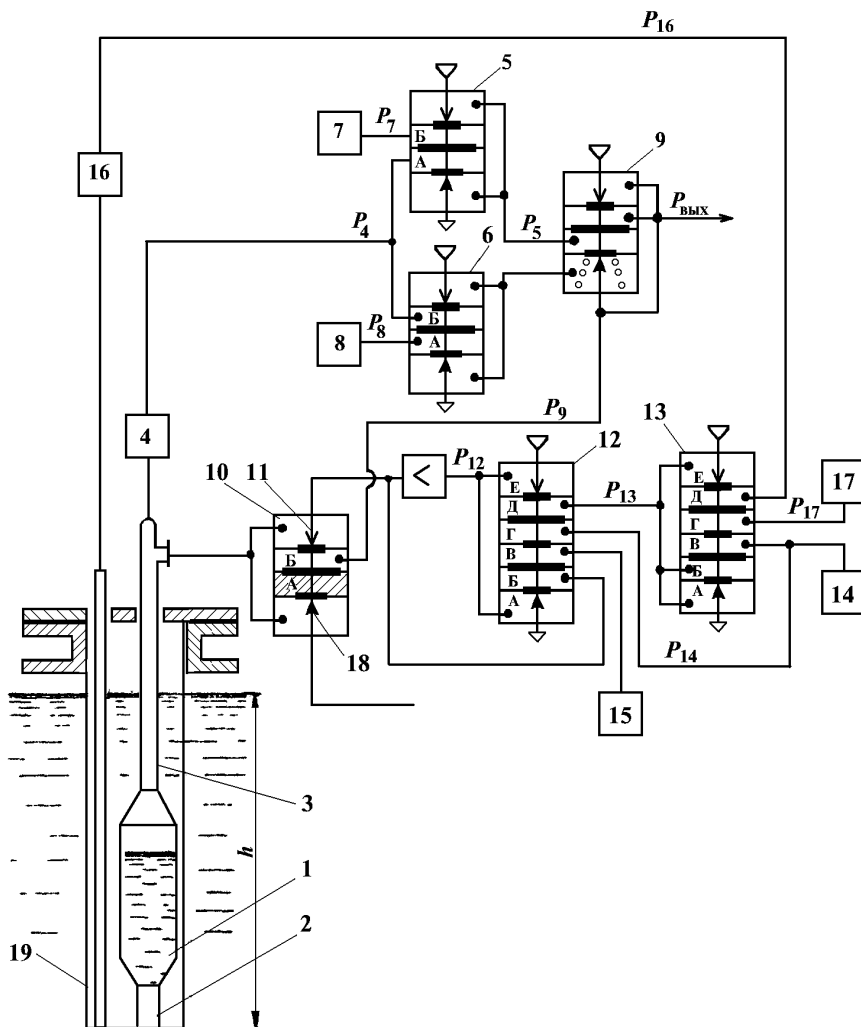
где  $V_{из}$  - объем измерительного элемента;  $\rho_{ж}$ ,  $\rho_{г}$  - плотность жидкости и газа, соответственно.

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

$$F = G - F_v ,$$

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.



**Рис. 3.3 Устройство для контроля вязкости жидкости с блоком компенсации влияния неконтролируемых величин**

Поступающие в соответствующие камеры элементов сравнения, давления с выхода преобразователя в начальный момент меньше давлений, устанавливаемых задатчиками 7 и 8, поэтому на выходе элемента сравнения 5 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, а следовательно, 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  $P_{ап}$  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, т.е.  $P_{16} = P_{17}$ , на выходе элемента сравнения 15 присутствует давление

$$P_{13} = P_{14}. \quad (3.6)$$

Давление  $P_{13}$  с выхода пятимембранного элемента сравнения 13 поступает в камеру Д элемента сравнения 12. В камеру В элемента 12 подается давление  $P_{15}$  с выхода задатчика 15, соответствующее величине избыточного давления, при котором должно проходить измерение, в камеру Г этого же элемента подается давление  $P_{14}$  с выхода задатчика 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

$$P_{12} = P_{13} - P_{14} + P_{15}. \quad (3.7)$$

С учетом формулы (3.6) уравнение (3.7) 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

$$P_{16} = \rho_{\text{ж}}g(h \pm \Delta h) + (P_{\text{ап}} \pm \Delta P_{\text{ап}}), \quad (3.8)$$

где  $h$  - 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 (3.8) 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

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

**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

$$t = \frac{128 \cdot \Delta F_v \eta_j l}{\pi d^4 \Delta P_k (\rho_j - \rho_r)},$$

где  $\Delta F_v$  - изменение выталкивающей силы, действующей на полностью погруженный измерительный элемент при вытеснении из него избыточным давлением  $P_{12}$  контролируемой жидкости через капилляр;  $\eta_j$  - вязкость жидкости;  $\Delta P_k$  - перепад давления на капилляре.

Величины  $\Delta F_v$ ,  $l$ ,  $d$ ,  $\Delta P_k$ ,  $\rho_j$ ,  $\rho_r$  являются постоянными, поэтому  $t = C \eta_j$ , 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.

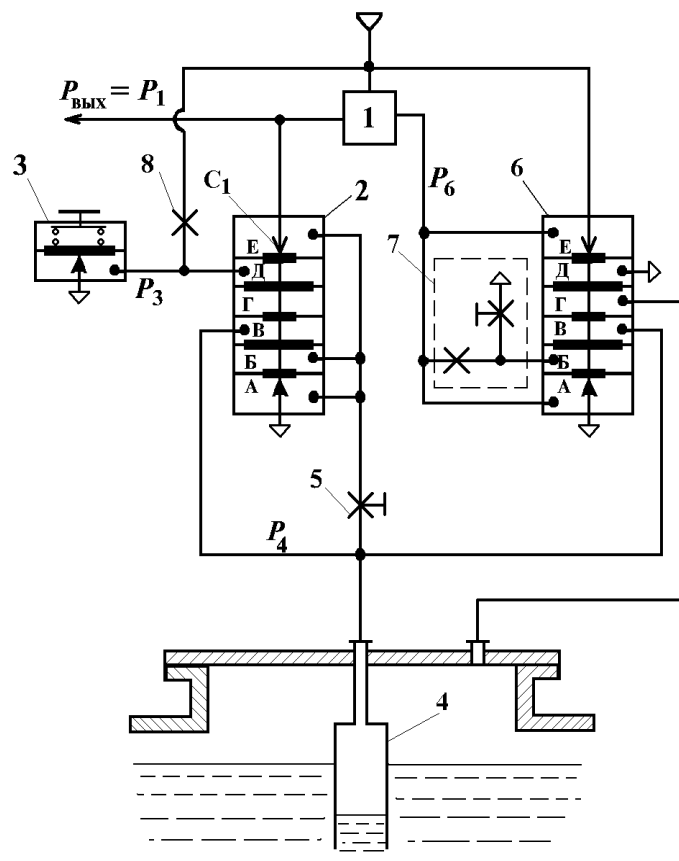
В случае необходимости измерения скорости истечения дозы контролируемой жидкости, рассмотренное устройство может быть снабжено регистратором, подключенным к выходу преобразователя силы в давление сжатого воздуха. При этом показания устройства не зависят от количества жидкости, остающейся на стенках измерительного сосуда по той причине, что 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.

### 3.3 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. 3.4) 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.



**Рис. 3.4** Пьезометрический плотномер с компенсацией влияния изменения давления в аппарате

В камеру  $D_2$  сумматора 2 подключен выход задатчика 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  $\Gamma_6$  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 задатчика 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  $P_1 = 1$ , которое подано в сопло  $C_1$  пятимембранного сумматора 2.

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

$$P_2 = P_3 + P_4, \quad (3.10)$$

где  $P_3$  - давление, устанавливаемое задатчиком 3;  $P_4$  - давление в полости измерительной камеры 4.

Массовый расход  $G$  газа через дроссель 5 выражается соотношением

$$G = \beta(P_2 - P_4), \quad (3.11)$$

где  $\beta$  - проводимость дросселя 5.

С учетом уравнения (3.10) уравнение (3.11) 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  $P_\Gamma = \rho_{ж}gh$ , где  $\rho_{ж}$  - плотность контролируемой жидкости,  $h$  - уровень жидкости.

Давление в измерительной камере, равное  $P_4 = P_\Gamma + P_\Pi$ , в значительной степени зависит от давления  $P_\Pi$  над поверхностью контролируемой жидкости. Для исключения влияния давления  $P_\Pi$  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

$$P_6 = kP_\Gamma,$$

где  $k$  - коэффициент усиления.

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

$$P_\Gamma = \rho_{ж}gh.$$

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

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

где  $P_{\Gamma \max}$  - максимальное гидростатическое давление, при котором прекращается заполнение измерительной камеры сжатым воздухом;  $P_{\max}$  - 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

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

где  $P_{\Gamma \min}$  - минимальное гидростатическое давление, при котором прекращается разгрузка измерительной камеры;  $P_{\min}$  - 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 на основе 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 измерительную камеру 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 [5, 6], 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. 3.5), 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 пьезометрической трубкой 10, погруженной в жидкость, находящуюся в проточном сосуде с постоянным уровнем (не показан).

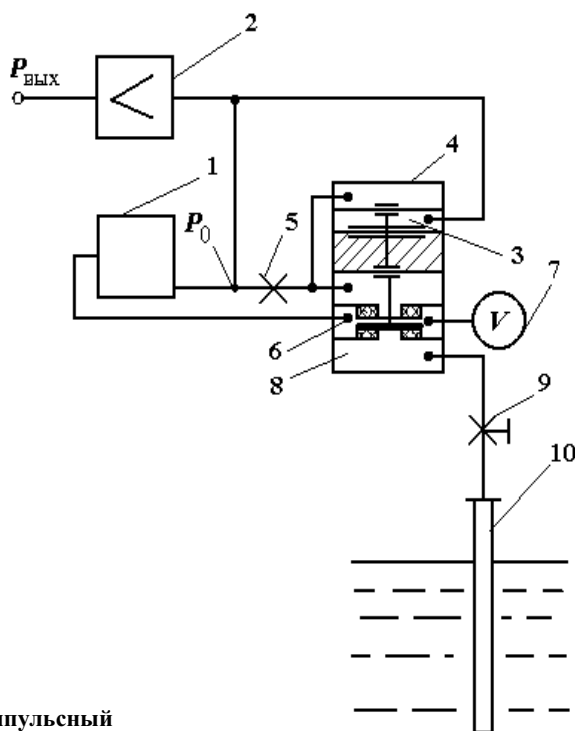


Рис. 3.5 Пьезометрический импульсный плотномер

На рис. 3.6 представлена временная диаграмма работы пьезометрического импульсного плотномера.

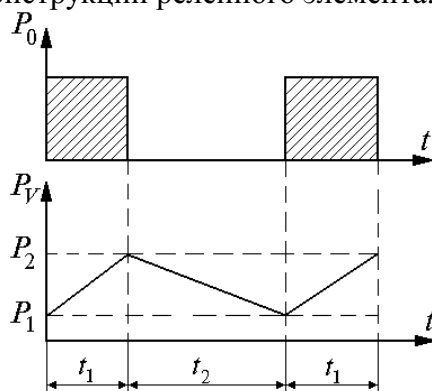
Принцип работы пьезометрического плотномера заключается в том, что процессы заполнения и разгрузки пневмоемкости 7 осуществляются раздельно. При этом

$$\alpha_1 \neq 0, \alpha_2 = 0, \text{ если } P_0 = 1 \text{ и } \alpha_1 = 0, \alpha_2 \neq 0, \text{ если } P_0 = 0,$$



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 (датчиками) в конструкции релейного элемента.



**Рис. 3.6** Временная диаграмма работы пьезометрического импульсного плотномера

Время заполнения пневмоемкости 7 от давления  $P_1$  до  $P_2$  является постоянной величиной, т.е. независимой от плотности контролируемой жидкости. После достижения давлением в пневмоемкости 7 значения  $P_2$  начинается процесс разгрузки посредством соединения пневмоемкости 7 через переменный дроссель с пьезометрической трубкой 10. Время разгрузки  $t_2$  (рис. 3.6) пневмоемкости 7 от давления  $P_2$  до  $P_1$  зависит от гидростатического давления, т.е. при постоянном уровне - от плотности жидкости  $\rho$ .

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, пневмоемкостью 7 и с входом релейного элемента 1. В общем объеме, состоящем из камеры 6, пневмоемкости 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  $V$ ).

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 1 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

$$P_{\Gamma} = \rho_{ж}gh.$$

Время разгрузки  $t_2$  (рис. 3.6) общего объема  $V$  определяется формулой

$$t_2 = \tau_1 \ln [(P_2 - P_\Gamma)/(P_1 - P_\Gamma)],$$

где  $\tau_1 = V_1/(RT\alpha_2)$  - постоянная времени,  $V_1 = V + V_2$  - объем глухой пневматической камеры;  $V_2$  - объем камеры 8.

После достижения давлением в общем объеме значения  $P_1$  произойдет обратное переключение релейного элемента 1, 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.

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.

### **3.4 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 процессов, при осуществлении которых происходит выделение веществ в виде газа. Измерив 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, возможно 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. 3.7) включает канал 1 золотникового элемента 2, к которому присоединен источник газовыделений (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

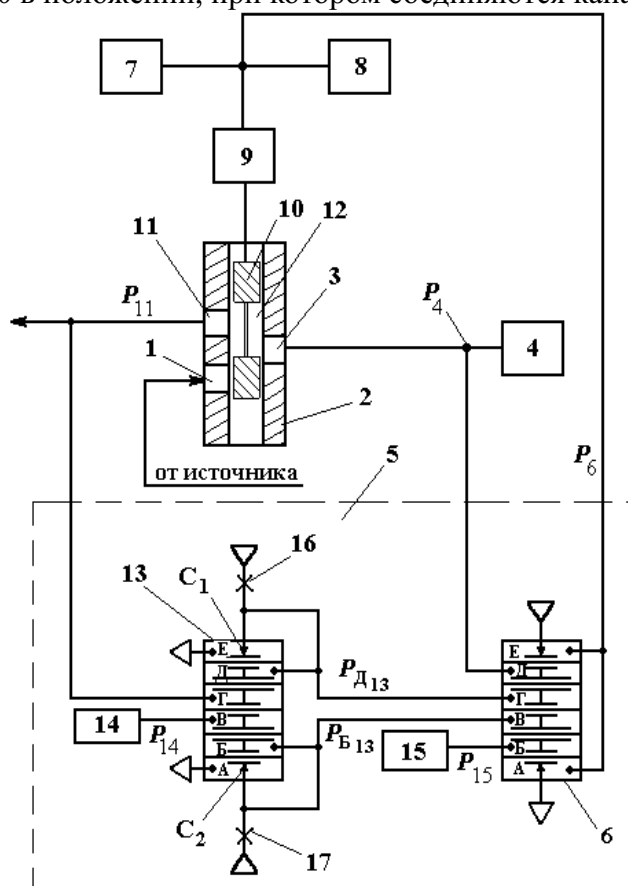
элемента 2 соединен с атмосферой или со сборной емкостью, а канал 12 золотника 10 связывает между собой каналы 1 и 3 или каналы 11 и 3.

Преобразователь 5 давления выполнен в виде двух пятимембранных пневматических элементов сравнения 6 и 13, двух задатчиков давления 14 и 15 и двух постоянных дросселей 16 и 17. Сопла  $C_1$  и  $C_2$ , расположенные соответственно в камерах  $A_{13}$  и  $E_{13}$  пятимембранного элемента сравнения 13, 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 газовыделений 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, который удерживает золотник 10 в положении, при котором соединяются каналы 1 и 3.



**Рис. 3.7 Устройство для измерения скорости и количества выделяющихся газов**

Газы от источника газовыделений 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 сравнения 6 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

$$M_0 = (P_{15} - P_{11})V/(RT), \quad (3.12)$$

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 (3.12) 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 сравнения 6 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

$$W = \frac{(P_{15} - P_{11})Vf}{RT}.$$

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 давления 5.

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  $B_{13}$ . Под действием разности этих давлений перемещается регистрирующий орган, 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

$$P_{Б13} = 0, P_{Д13} = P_{11} - P_{14} = \Delta P.$$

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 (3.12) 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 (3.12) 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 постоянное наперед заданное количество газа. Кроме того, для пневматических элементов используются в качестве входных давлений давления измеряемой газовой среды без дополнительного преобразования

### 3.5 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



Выход пятимембранного элемента 13 подключен к камере Б<sub>13</sub> и через дроссель 12 к компенсационной емкости 19, которая подключена к камере Д<sub>13</sub> и к камере Б<sub>11</sub> трехмембранного элемента сравнения 11. В камеру В<sub>11</sub> и в камеру Г<sub>5</sub> включен выход датчика давления 4. Выход трехмембранного элемента сравнения 11 соединен с камерой Б<sub>5</sub>. Выход пятимембранного элемента сравнения 5 подключен к входу измерителя длительности 6.

Измерительная емкость 1 подключена в сопло 7 пневмоклапана 10, в сопло 9 которого подключена компенсационная емкость 19. Сопловые камеры А<sub>10</sub> и Д<sub>10</sub> соединены с атмосферой. В камеры Б<sub>10</sub> и Г<sub>10</sub> подано давление подпора, а камера В<sub>10</sub> подключена к выходу генератора прямоугольных импульсов управления 8. Контролируемое вещество помещают в измерительную емкость 1, которую после этого герметично закрывают крышкой 3.

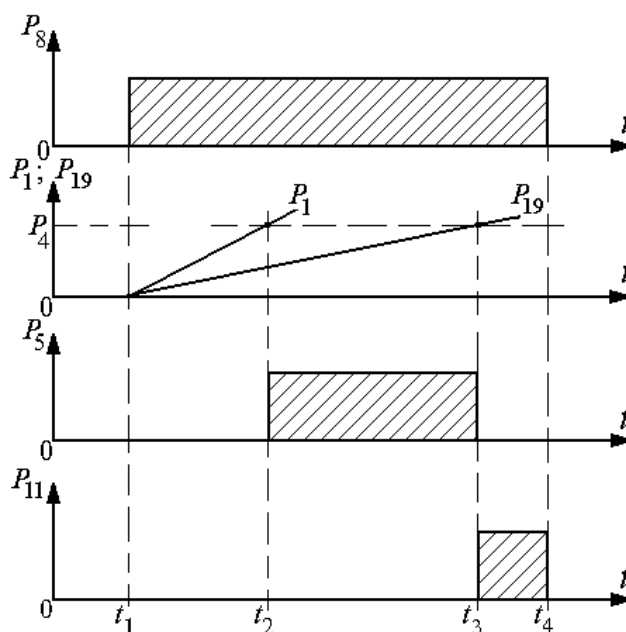


РИС. 3.9 ВРЕМЕННАЯ ДИАГРАММА РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Процесс измерения начинается в момент поступления (момент времени  $t_1$  на рис. 3.9) в камеру В<sub>10</sub> сигнала  $P_8 = 1$  с выхода источника импульсов управления 8. 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. 3.9) происходит соединение емкостей 1 и 19 с атмосферой и подготовка их к очередному циклу измерения (рис. 3.8).

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  $F_{p1} = P_1 S$  от давления  $P_1$  в емкости 1 на поверхность мембраны 17 с площадью  $S$ . Действие силы  $F_1 = F_m + F_{p1}$  уравнивается силой  $F_2 = P_{15} S$  от давления  $P_{15}$  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  $D_5$  пятимембранного элемента сравнения 5, осуществляющего сравнение давлений  $P_1$  и  $P_4$ , поступающего в камеру  $\Gamma_5$  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  $\Gamma_{13}$  и  $B_{13}$  пятимембранного элемента сравнения 13, включенного по схеме повторителя путем подачи выходного давления  $P_{13}$  на его вход в камеру  $B_{13}$ . 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

$$\frac{(V_1 - V_b) dP_1}{RT dt} = \alpha_{14} \frac{mg}{S}, \quad (3.14)$$

где  $V_1, V_b$  - объем емкости 1 и частиц сыпучего материала;  $\alpha_{14}$  - проводимость дросселя 14.

Время  $t_{12}$  (рис. 3.9), в течение которого давление  $P_1$  изменяется от атмосферного до значения  $P_4$ , определяемого настройкой задатчика 4, находится путем решения уравнения (3.14) в виде

$$t_{12} = \frac{(V_1 - V_b) S m_4}{m RT \alpha_{14} g}. \quad (3.15)$$

Процесс заполнения емкости 19 с объемом  $V_{19} = V_1$  сжатым газом через дроссель 12 с проводимостью  $\alpha_{12} = \alpha_{14}$  описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{V_1 dP_{19}}{RT dt} = \alpha_{14} \frac{mg}{S}.$$

Время  $t_{13}$  (рис. 3.9) изменения давления  $P_{19}$  в емкости 19 от атмосферного давления до давления  $P_4$

$$t_{13} = \frac{V_1 \cdot SP_4}{m RT \alpha_{14} g}. \quad (3.16)$$

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. 3.9). 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,

$$t_{23} = \Delta t = t_{13} - t_{12}. \quad (3.17)$$

Время  $t_{13} > t_{12}$  причем их разность определяет пикнометрической плотностью контролируемого вещества. После подстановки в (3.17) значений времени из (3.15) и (3.16) получим

$$\Delta t = \frac{V_B}{m} \frac{Sm_4}{RT\alpha_{14}g} = \frac{A}{\rho_6} = A\nu, \quad (3.18)$$

где  $A = \frac{Sm_4}{RT\alpha_{14}g} = \text{const}$  при условии постоянства температуры  $T$  и проводимости дросселя  $\alpha_{14}$ ;

$\rho_6 = \frac{m}{V_B}$  - 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.

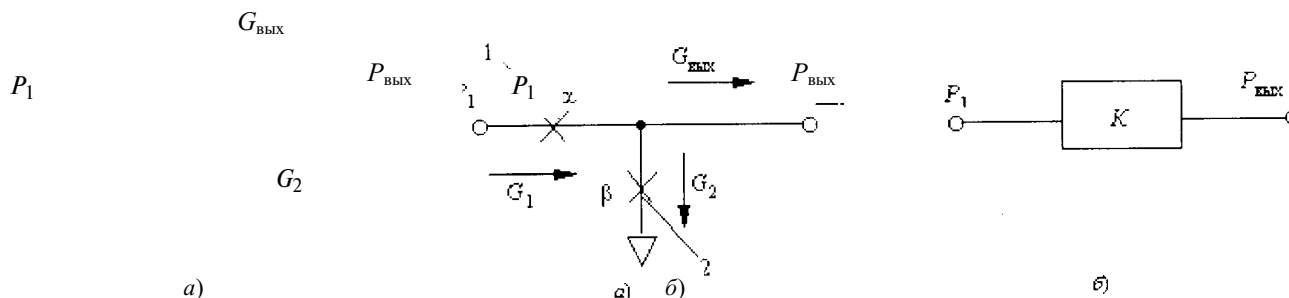
#### **4 АНАЛИЗ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ВЕЩЕСТВ**

Измерительные устройства, выполненные из пневматических элементов, имеют присущие только им статические и динамические характеристики., определяющие зависимости выходного и входного сигналов в различных режимах работы. При анализе пневматических схем сложных по конструкции устройств целесообразно представление их в виде совокупности более простых соединений. Как правило, большинство пневматических устройств контроля веществ представляют собой соответствующие соединения блоков, образованных из дросселирующих и накопительных элементов, а также операционных усилителей. Учитывая изложенное, рассмотрим методы анализа основных блоков устройств контроля веществ.

##### **4.1 Устройства из дросселирующих и накопительных элементов**

Устройство, представленное на рис. 4.1, состоит из двух дросселей 1 и 2 с проводимостями  $\alpha$  и  $\beta$ , соответственно. На дроссель 1 подается входное давление  $P_1$ , а вход дросселя 2 соединен с атмосферой. Выходной сигнал  $P_{\text{вых}}$  отбирается из междроссельной камеры, причем на выходе отсутствует расход газа ( $G_{\text{вых}} = 0$ ), т.е. существует так называемый

потенциальный выход. Формирование потенциального выхода осуществляется путем подключения к междроссельной камере пневмоповторителя. Если в устройстве междроссельная камера подключается к емкости или соединительные линии обладают существенной емкостью, то необходимо это учитывать.



**Рис. 4.1** Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного делителя

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

$$G_1 = \alpha(P_1 - P_{\text{вых}}), \quad G_2 = \beta(P_{\text{вых}} - P_{\text{атм}}). \quad (4.1)$$

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

$$G_1 = G_2 + G_{\text{вых}}. \quad (4.2)$$

Из (4.1) и (4.2) получим зависимость выходного давления от входного:

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

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 пневмокамеры, собранной на двух дросселях и емкости (рис. 4.2), т.е. схемы дроссельного делителя, нагруженного емкостью.

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

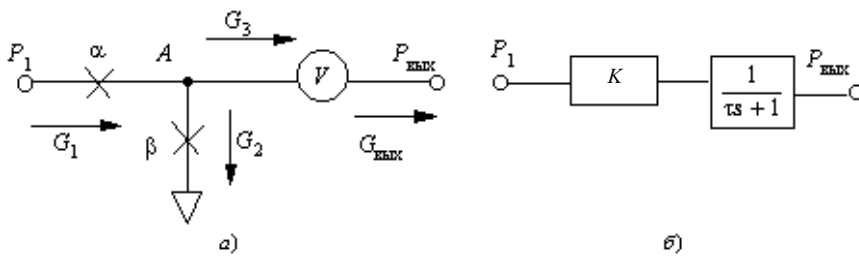


Рис. 4.2 Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного делителя, нагруженного емкостью

В устройстве выходной сигнал отбирается из емкости в виде давления воздуха, при этом  $G_{\text{вых}} = 0$ . Состояние газа в емкости описывается уравнением Менделеева-Клапейрона:  $P_{\text{вых}}V = \theta RT$ .

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

Для того, чтобы не быть связанным с произвольным отрезком времени, устремим этот промежуток времени к нулю:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{или} \quad \frac{d\theta}{dt} = G_3.$$

Получается следующее дифференциальное уравнение:

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

По принципиальной схеме и математическому описанию устройства составим структурную схему (рис. 4.2, б), представляющую собой последовательно соединенные усилительное и апериодическое звенья.

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

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

Рассмотренное устройство, собранное на емкостях и дросселях, представляет собой последовательно соединенные усилительное звено с коэффициентом передачи меньше единицы и апериодическое звено, постоянная времени которого пропорциональна объему емкости и обратно пропорциональна сумме проводимостей дросселей.

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

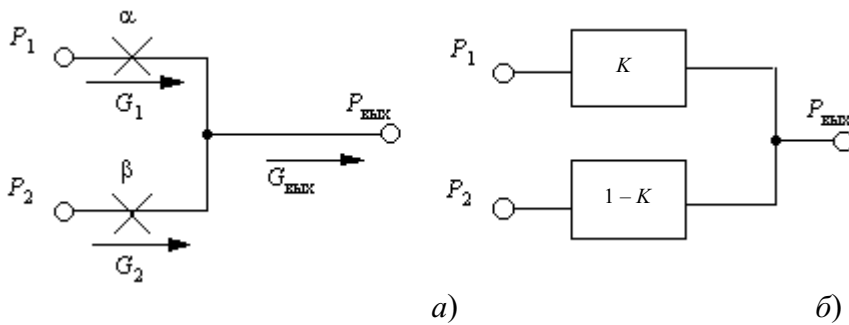
При подаче на вход сигнала  $P_{\text{вх}}(t) = P_0 \cdot 1(t)$ , значение выходного сигнала в установившемся режиме определим, используя теорему о конечном значении [7]:

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

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

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

Если в дроссельном делителе (рис. 4.1) на вход дросселя  $\beta$  подадим давлением  $P_2$ , то получим дроссельный сумматор (рис. 4.3).



**Рис. 4.3** Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного сумматора

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

$$G_1 = \alpha(P_1 - P_{\text{вых}}), \quad G_2 = \beta(P_2 - P_{\text{вых}}), \quad G_1 + G_2 = G_{\text{вых}} = 0. \quad (4.3)$$

Из (4.3) получается зависимость выходного давления от входного:

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

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

При подключении дроссельного сумматора к пневмоемкости (рис. 4.4) и отборе из нее выходного сигнала в потенциальной форме, происходящие процессы описываются уравнениями:

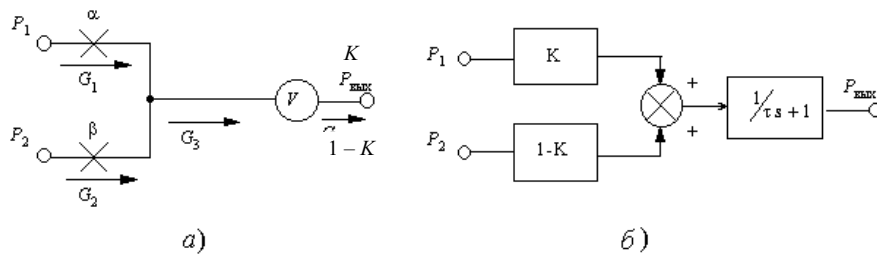
$$G_1 = \alpha(P_1 - P_{\text{вых}}), \quad G_2 = \beta(P_2 - P_{\text{вых}}),$$

$$G_1 + G_2 = G_3, \quad G_{\text{вых}} = 0, \quad (4.4)$$

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

Из (4.4) получим дифференциальное уравнение

$$\tau \frac{dP_{\text{вых}}}{dt} + P_{\text{вых}} = KP_1 + (1 - K)P_2, \quad \text{где } \tau = \frac{V}{(\alpha + \beta)RT}, \quad K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}.$$



**Рис. 4.4** Принципиальная (а) и структурная (б) схемы дроссельного сумматора, нагруженного на емкость

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

При подаче на входы давлений  $P_1(t) = P_1 l(t)$  и  $P_2(t) = P_2 l(t)$  выходной сигнал примет вид

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

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

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

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

Из выражения передаточной функции определим выходной сигнал в установившемся режиме

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

из которого, используя теорему о конечных значениях, получим

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

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

При анализе дроссельного сумматора, имеющего  $n$  входов, нагруженного на емкость  $V$ , получаются аналогичные дифференциальные уравнения и передаточная функция, 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 пневмоемкостей.

Процессы, протекающие в устройстве, описываются уравнениями:

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

$$G_1 = G_2 + G_3, \quad G_2 = G_4 + G_{\text{ВЫХ}}, \quad G_{\text{ВЫХ}} = 0, \quad (4.5)$$

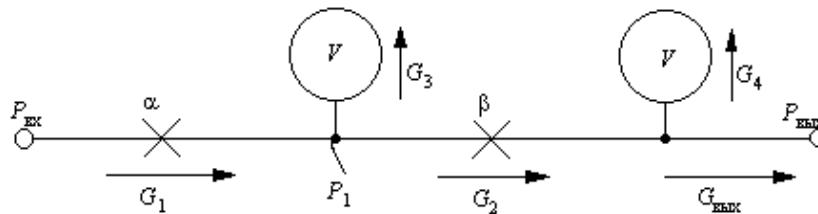
$$G_3 = \frac{d\theta_1}{dt}, \quad G_4 = \frac{d\theta_2}{dt}, \quad P_1 V = \theta_1 RT, \quad P_{\text{ВЫХ}} V = \theta_2 RT.$$

Из (4.5) получаем дифференциальное уравнение, описывающее изменение выходного сигнала устройства

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

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

Процессы, протекающие в устройстве, имеющем в своем составе два последовательно соединенных независимых накопителя воздуха, описываются дифференциальным уравнением второго порядка. Две емкости (рис. 4.5), последовательно соединенные через дроссель  $\beta$ , являются независимыми накопителями, так как они не могут быть преобразованы в один накопитель.



**Рис. 4.5** Принципиальная схема пневматического инерционного звена второго порядка

Вид решения дифференциального уравнения

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

зависит от дискриминанта характеристического уравнения:  $a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0 = 0$ .

Общее решение дифференциального уравнения при нулевых начальных условиях  $P_{\text{ВЫХ}}(0) = 0$ ,  $P'_{\text{ВЫХ}}(0) = 0$  приведено в табл. 4.1.

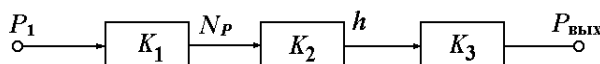
#### 4.1 Общее решение дифференциального уравнения

Значение дискриминанта характеристического уравнения	Значение корней характеристического уравнения	Общее решение дифференциального уравнения	Значение коэффициентов
$a_1^2 - 4a_2 a_0 > 0$	$\lambda_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2 a_0}}{2a_2}$	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = C_0 + C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}$	$C_0 = \frac{b}{a_0}$ ,

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

#### 4.2. Устройства с пневматическими операционными усилителями

Схема преобразования информации в элементе сравнения показана на рис. 4.6. Входные давления подаются в камеры Д, Г, В и Б. Каждая камера элемента отделена резиноканевой мембраной, зажатой между двумя металлическими дисками.



**Рис. 4.6** Схема преобразования информации в элементе сравнения

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

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

На мембранном блоке происходит алгебраическое суммирование этих сил:

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

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

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

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

$$P_{\text{ВЫХ}} = K_3 h = K_1 K_2 K_3 P_1 = K P_1, \quad K = K_1 K_2 K_3.$$

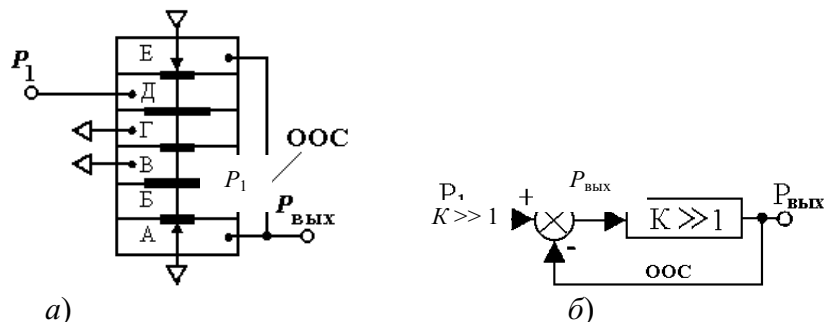
Таким образом, из полученного уравнения видно, что пятимембранный элемент сравнения является усилительным звеном.

Рассмотрим устройство, выполненное на пятимембранном элементе сравнения (рис. 4.7). В камеру Д подано давление  $P_{\text{ВХ}}$ , камеры Г и В соединены с атмосферой, а выходное давление подано в камеру Б.

Подадим на вход элемента давление  $P_{\text{ВХ}} = 1$  кПа. Под действием этого давления мембранный блок перемещается вниз. Проводимость верхнего элемента "сопло-заслонка" увеличивается, а нижнего - уменьшается. Расход газа через верхнее сопло увеличивается и

уменьшается сброс газа в атмосферу, при этом выходное давление увеличивается. Оно подается вновь на вход элемента, т.е. в схеме имеется обратная связь.

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



**Рис. 4.7** Принципиальная (а) и структурная (б) схемы устройства

При наличии отрицательной обратной связи равновесие мембранного блока можно записать в виде алгебраической суммы давлений на входах элемента

$$P_{\text{Д}} - P_{\text{Г}} + P_{\text{Б}} - P_{\text{Б}} = 0, \quad (4.6)$$

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

Из уравнений (4.6) найдем  $P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}}$ .

Передаточная функция имеет вид

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

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

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

$$P_{\text{вх}} = P_0 \cdot 1(t); \quad P_{\text{вых}}(s) = P_{\text{вх}}(s) W(s) = \frac{P_0}{s}.$$

Согласно теореме о конечном значении

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

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

Подадим на вход элемента сравнения три входных сигнала  $P_1, P_2, P_3$  (рис. 4.8).

В устройстве (рис. 4.7), обратная связь (подача выходного давления  $P_{\text{вых}}$  в камеру Б) является отрицательной обратной связью. Будет ли эта обратная связь отрицательной для входного сигнала  $P_2$ ? Рассмотрим равновесие мембранного блока. Если выходной сигнал  $P_2$  уменьшится, то нарушится баланс сил и уменьшится сумма сил, действующих вверх. Мембранный блок элемента начинает опускаться вниз.



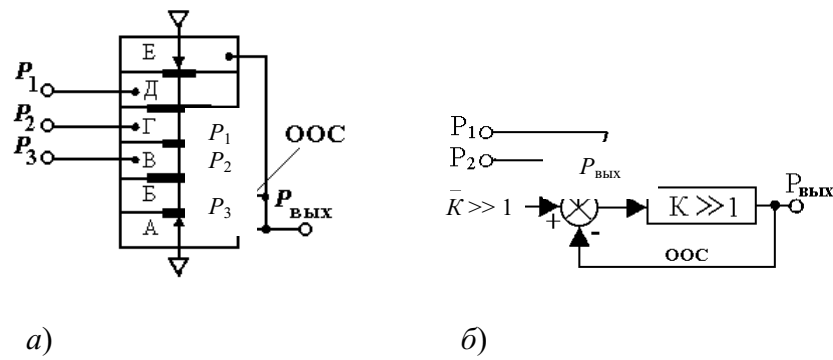


Рис. 4.8 Принципиальная (а) и структурная (б) схемы устройства

Выходное давление  $P_{\text{вых}}$  увеличивается. В камере Б возрастает сила, направленная вверх. Движение мембранного блока прекращается. Изменение входного сигнала приводит к перемещению мембранного блока вниз, что, в свою очередь, к увеличению выходного давления и возрастанию силы, образованной возрастающим давлением в камере Б. Обратная связь действует противоположным образом на мембранный блок, чем изменение входного сигнала. Поэтому такая обратная связь является отрицательной обратной связью.

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

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

В соответствии со схемой устройства следует записать:

$$P_{\text{Д}} = P_1, P_{\text{Г}} = P_2, P_{\text{Б}} = P_3, P_{\text{Б}} = P_{\text{вых}}.$$

Тогда выходной сигнал определится следующим образом:

$$P_{\text{вых}} = P_1 - P_2 + P_3.$$

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

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

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

Рассмотрим схему, построенную на трехмембранном элементе сравнения и дроссельном делителе (рис. 4.9).

Условием равновесия мембранного блока трехмембранного элемента сравнения является выражение  $+P_{\text{Б}} - P_{\text{Б}} = 0$ .

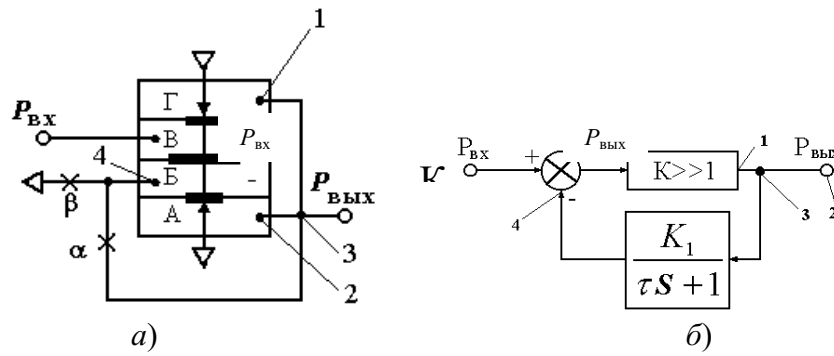


Рис. 4.9 Принципиальная (а) и структурная (б) схемы устройства

На принципиальной схеме (рис. 4.9., а) линия 1-2 соответствует линии 1-2 на структурной схеме (рис. 4.9, б). Выходной сигнал  $P_{\text{ВЫХ}}$  по линии 3-4 подается во входную камеру Б. Этой линии на структурной схеме соответствует линия 3-4. Поэтому можно утверждать, что в схеме устройства имеется обратная связь (именно линия 3-4). Определим знак обратной связи. Для этого рассмотрим состояние равновесия, при этом на входе имеется некоторый входной сигнал  $P_{\text{ВХ}}$  и на выходе сформирован сигнал  $P_{\text{ВЫХ}}$ . Мембранный блок элемента находится в равновесии. Подадим на вход единичный ступенчатый сигнал с амплитудой  $P_0$ . 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 обратной связи. Выходное давление возрастает до тех пор, пока вновь не наступит равновесие мембранного блока.

Процессы, происходящие в устройстве в статическом и динамическом режимах работы, описываются соответствующими уравнениями:

$$+P_B - P_B = 0, \quad \tau \frac{dP_B}{dt} + P_B = KP_{\text{ВЫХ}}, \quad \tau = \frac{V}{(\alpha + \beta)RT}, \quad (4.7)$$

$$K_1 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}, \quad P_{\text{ВЫХ}} = P_B.$$

Из (4.7) получаем дифференциальное уравнение

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

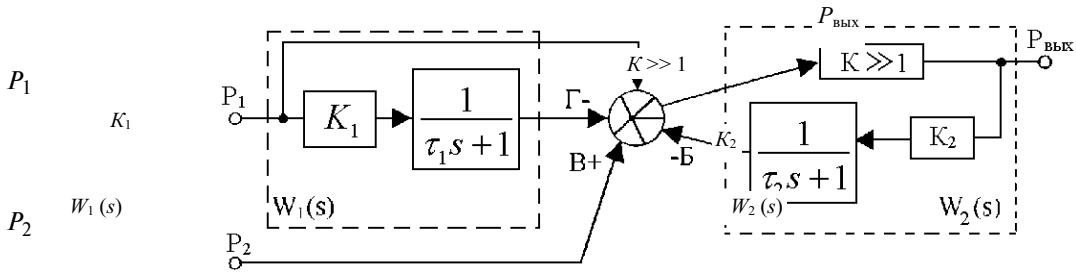
В установившемся режиме получаем  $P_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{K_1} P_{\text{ВХ}}$ .

Таким образом, выходной сигнал по сравнению с входным увеличен.

В обратной связи часть входного сигнала сбрасывается в атмосферу, а оставшаяся часть уравновешивает входной сигнал. Поэтому выходной сигнал возрастает по сравнению с входным именно на ту часть, которая стравливается в атмосферу.



Для определения передаточной функции  $W(s)$  устройства в начале найдем передаточные функции  $W_1(s)$  и  $W_2(s)$  частей схемы, отмеченных на рис. 4.11.



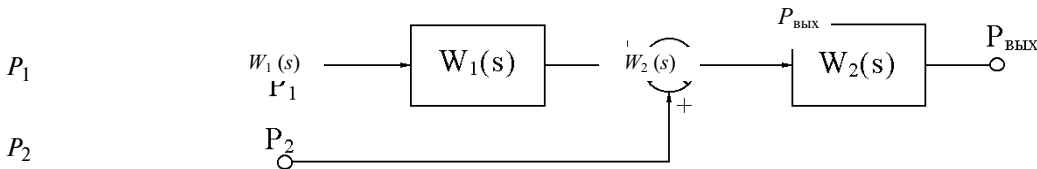
**Рис. 4.11 Структурная схема устройства**

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

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

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

Тогда структурная схема устройства преобразуется к виду, представленному на рис. 4.12.



**Рис. 4.12 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  $P_1 = 0$

$$W_4(s) = W_2 = \frac{\tau_2 s + 1}{K_2}, \quad (4.12)$$

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:

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

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

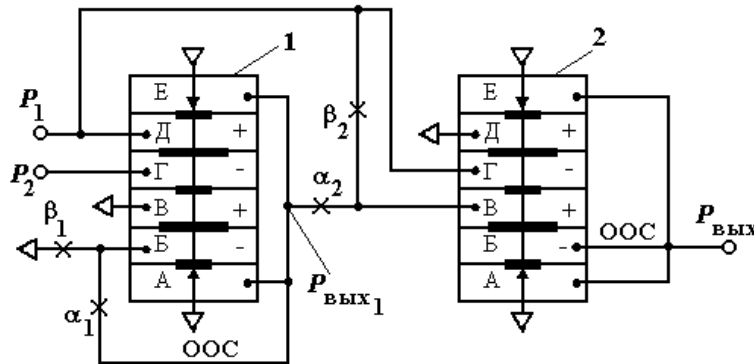
Согласно теореме о конечном значении  $\lim_{t \rightarrow \infty} P_{\text{ВЫХ}}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s P_{\text{ВЫХ}}(s).$

Тогда

$$P_{\text{ВЫХ}}(\infty) = \frac{1 - K_1}{K_2} P_1 + \frac{1}{K_2} P_2. \quad (4.13)$$

Полученное из передаточных функций выражение (4.12) для выходного сигнала  $P_{\text{ВЫХ}}$  (4.13) 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 (4.11). Это совпадение подтверждает правильность анализа схемы устройства.

При анализе устройства (рис. 4.13), 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.



**Рис. 4.13** Принципиальная схема устройства, построенного на двух пятимембранных элементах сравнения

В элементах 1 и 2 имеются отрицательные обратные связи, поэтому условие равновесия мембранного блока для каждого из этих элементов будет иметь вид

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

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

$$P_{\text{Д}} = P_1, \quad P_{\text{Г}} = P_1, \quad P_{\text{В}} = 0, \quad P_{\text{Б}} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1} P_{\text{ВЫХ1}}.$$

Тогда для выходного сигнала  $P_{\text{ВЫХ1}}$  элемента 1 справедливо равенство

$$P_{\text{ВЫХ1}} = \frac{\alpha_1 + \beta_1}{\alpha_1} (P_1 - P_2).$$

Для элемента 2 имеем

$$P_{\text{Д}} = 0, \quad P_{\text{Г}} = P_1, \quad P_{\text{В}} = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2} P_{\text{ВЫХ1}} + \frac{\beta_2}{\alpha_2 + \beta_2} P_1, \quad P_{\text{Б}} = P_{\text{ВЫХ}},$$

тогда

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2} \left( \frac{\beta_1}{\alpha_1} P_1 - \frac{\alpha_1 + \beta_1}{\alpha_1} P_2 \right). \quad (4.14)$$

Учитывая, что

$$K_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \beta_2}, \quad \frac{1}{K_2} = \frac{\alpha_1 + \beta_1}{\alpha_1}, \quad \frac{\beta_1}{\alpha_1} = K_1 - 1,$$

из (4.14) получим

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 \left( \frac{K_2}{K_1} - K_2 \right) - \frac{K_2}{K_1} P_2. \quad (4.15)$$

По принципиальной схеме устройства составим структурную схему (рис. 4.14).

Передаточные функции  $W_1(s)$  и  $W_2(s)$  определим с учетом того, что в соединении исходных элементов использованы цепи отрицательных обратных связей. Примеры нахождения передаточной функции системы, имеющей различные виды соединений звеньев, приведены в прил. 7.

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

$$W_2(s) = \frac{K}{1 + K} \approx 1, \quad \text{где } K_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \beta_1}, \quad \tau_1 = \frac{V}{(\alpha_1 + \beta_1)RT}. \quad (4.16)$$

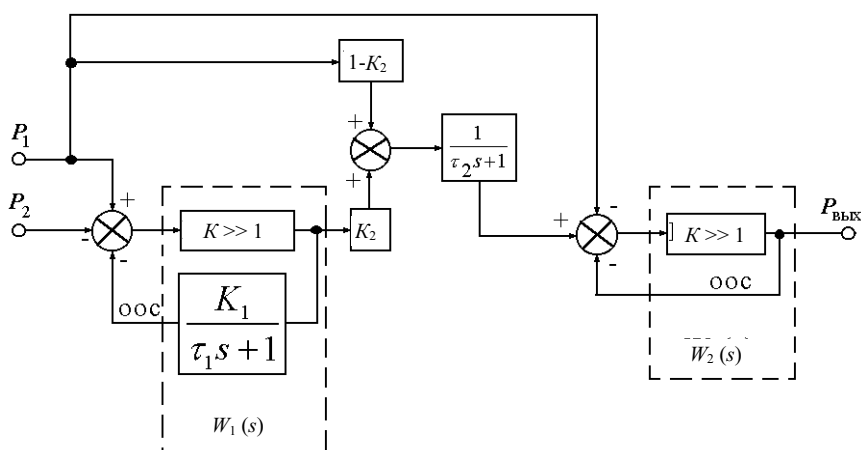


Рис. 4.14 Структурная схема устройства

С учетом (4.16) структурная схема устройства преобразуется к виду (рис. 4.15):

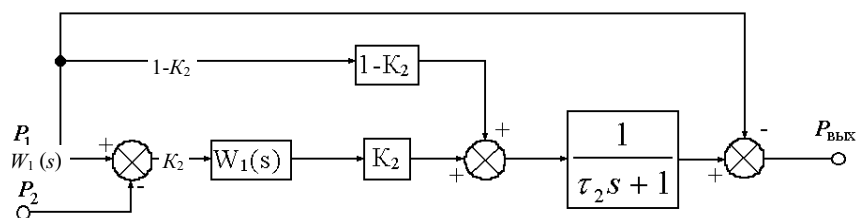


Рис. 4.15 Преобразованная структурная схема устройства

Определим передаточную функцию  $W_3(s)$  устройства по каналу  $P_1$ , при этом значение давления  $P_2$ , 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  $P_1(t) = P_1 l(t)$  и  $P_2(t) = P_2 l(t)$ :

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

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{\text{вых}}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s P_{\text{вых}}(s) = P_1 \left( \frac{K_2}{K_1} - K_2 \right) - \frac{K_2}{K_1} P_2. \quad (4.17)$$

Совпадение результатов (4.15) и (4.17) подтверждает правильность составления структурной схемы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из основных требований при создании устройств контроля веществ, является соблюдение единства энергии используемой как для реализации метода измерения, так и для формирования и передачи выходного сигнала.

Техническая реализация совокупности действий соответствующего пневматического метода измерения, с учетом особенностей контролируемого вещества и условий измерения может быть успешно осуществлена с помощью технических средств пневмоавтоматики, то есть элементов и узлов, работа которых основана на использовании энергии сжатого воздуха. Наиболее целесообразно применение средств пневмоавтоматики для автоматизации контроля веществ в условиях потенциально опасных производств.

Теоретические и практические знания элементной базы и типовых узлов пневмоавтоматики дают возможность осуществить автоматизацию всех операций, направленных на реализацию пневматических методов измерения плотности жидких и сыпучих материалов, вязкости жидких и газообразных веществ и др.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 *Дмитриев В. Н., Градецкий В. Г.* Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1973. 360 с.
- 2 *Элементы и схемы пневмоавтоматики / Т. Г. Берендс, Т. К. Ефремова, А. А. Тагаевская, С. А. Юдитский.* 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1976. 246 с.
- 3 *Ибрагимов И. А., Фарзана Н. Г., Илясов Л. В.* Элементы и системы пневмоавтоматики. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985. 544 с.
- 4 *Залманзон Л. А.* Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем. М.: Наука, 1973. 464 с
- 5 *Мордасов М. М., Мищенко С. В., Мордасов Д. М.* Физические основы измерения плотности и поверхностного натяжения пневматическими методами: Учебн. пособие. Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 1999. 76 с.
- 6 *Кивилис С. С.* Плотномеры. М.: Энергия, 1980. 279 с.
- 7 *Егоров К. В.* Основы теории автоматического регулирования. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1967. 648 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### АНАЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

#### 1 Соотношение между электрическими и пневматическими величинами



## Величины

электрические			пневматические		
наименование	единица измерения	обозначение	наименование	единица измерения	обозначение
Ток	А	$I$	расход	кг/с	$G$
Напряжение	В	$U$	давление	Н/м <sup>2</sup>	$\Delta P$
Проводимость	Ом <sup>-1</sup>	$1/R$	проводимость	м·с	$\alpha$
Заряд	Кл	$Q$	заряд камеры	кг	$N$
Напряженность	В/м	$E$	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	$\frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}^2}$	$L = \frac{\Delta P}{\frac{d^2 N}{dt^2}}$

## 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	Величина расхода газа через капилляр пропорциональна разности давлений

	<p>потенциалов на его концах</p> $I \approx (\varphi_1 - \varphi_2),$ $I = \frac{1}{R}(\varphi_1 - \varphi_2)$	<p>на его концах</p> $G \approx (P_1 - P_2),$ $G = \alpha(P_1 - P_2)$
Обобщенный закон Ома	<p>Сила тока на участке цепи, где имеется источник ЭДС, пропорциональна сумме разности потенциалов на его концах и ЭДС</p> $I \approx (U_1 - U_2 + E),$ $I = \frac{1}{R}(U_1 - U_2 + E)$	<p>Величина расхода газа через капилляр пропорциональна сумме разности давлений на его концах и расходу источника газа</p> $G \approx (P_1 - P_2) + G_{и},$ $G = \alpha(P_1 - P_2) + G_{и}$
Первое правило Кирхгофа	<p>Алгебраическая сумма сил токов на участках цепи, сходящихся в узле, равна нулю</p> $\sum_{i=1}^n I_i = 0$	<p>Алгебраическая сумма расходов газа в узле равна нулю</p> $\sum_{i=1}^n G_i = 0$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Основные физические свойства воздуха при нормальном давлении

Свойство	Обозначение	Множитель	Размерность	Величина	
				0° С	25° С
1 Молекулярная масса	m	—	—	29	
2 Плотность	$\rho$	—	кг/м <sup>3</sup>	1,293	
3 Динамическая вязкость	$\eta$	10 <sup>-7</sup>	Па·с	171	184
4 Кинематическая вязкость	$\nu$	10 <sup>-7</sup>	м <sup>2</sup> /с	132	

5	Температурный коэффициент расширения		$10^{-5}$	$K^{-1}$	367	
6	Теплопроводность	$\lambda$	$10^{-4}$	Вт/(м·К)	243	257
7	Удельные массовые теплоемкости: при постоянном давлении при постоянном объеме	$C_p$ $C_v$	— —	Дж/(кг·К) Дж/(кг·К)	1004 717	
8	Показатель адиабаты	$\gamma$	—	—	1,4	
9	Скорость звука	$c$	—	м/с	331,36	
10	Газовая постоянная	$R$	—	Дж/(кг·К)	287	
11	Показатель поглощения звука при 1 кГц, относительной влажности 10 %		$10^{-4}$	$m^{-1}$		13
12	Диэлектрическая проницаемость	$\epsilon$	—	—	1,000059	
13	Растворимость в воде по массе		—	%	0,036	0,022

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

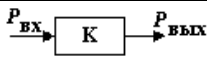
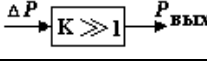
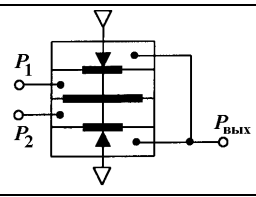
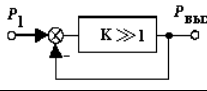
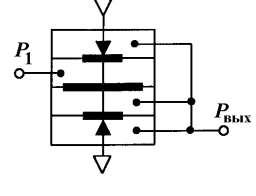
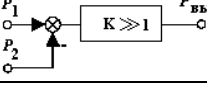
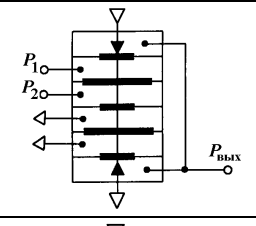
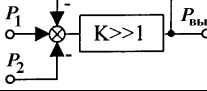
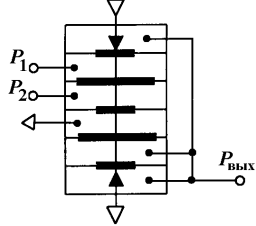
Конструкции типовых звеньев и устройств пневмоавтоматики

Название элемента или устройства. Условное изображение	Конструкция элемента или устройства	Математическое описание элемента или устройства
1	2	3
Мембрана		$F = F_1 - F_2 = S_0(P_1 - P_2),$ $W(s) = S_0$

Сильфон 		$W(s) = \frac{F_3 / K_c}{\tau_2 s^2 + \tau_1 s + 1}$ $x = \frac{F_3}{K_c} (P_1 - P_2)$
Пружина 		$x = \frac{F}{K_{\Pi}}$ $W(s) = \frac{1 / K_{\Pi}}{\tau_2 s^2 + \tau_1 s + 1}$
Рычаг 		$x_2 = Kx_1, F_2 = KF_1$ $W(s) = K$
Дроссель 		$G = \alpha(P_1 - P_2), W(s) = \alpha$
Пневмемкость 		$P_{\text{ВЫХ}} V = \theta RT$
Пневмокамера 		$W(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$

Продолжение прилож. 3

1	2	3
Дроссельный сумматор 		$P_{\text{ВЫХ}} = KP_1 + (1 - K)P_2$ $K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$
Дроссельный сумматор в режиме делителя 		$P_{\text{ВЫХ}} = KP_{\text{ВХ}}$ $K = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$

		
<p>Трехмембранный элемент сравнения</p> 		$P_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} 1, & P_1 > P_2, \\ 0, & P_1 < P_2. \end{cases}$
<p>Трехмембранный элемент сравнения с отрицательной обратной связью</p> 		$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ}}$
<p>Пятимембранный элемент сравнения</p> 		$P_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} 1, & P_1 > P_2, \\ 0, & P_1 < P_2. \end{cases}$
<p>Пятимембранный элемент сравнения с отрицательной обратной связью</p> 		$P_{\text{ВЫХ}} = P_1 - P_2$

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 4

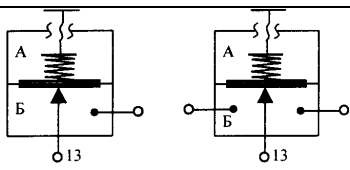
#### Технические характеристики комплекса элементов УСЭПА

Название и тип элемента	Конструкция элемента	Назначение элемента	Характеристики элемента
1	2	3	4
Индикатор пневматический типа ИП-1		Для визуального представления дискретной информации посредством изменения цвета показывающего органа.	Выходные пневматические сигналы - дискретные "0" или "1"

Реле трехмембранное пневматическое типа П1Р.1		Для реализации логических функций и коммутации непрерывных сигналов.	Выходные пневматические сигналы - дискретные "0" или "1" по ГОСТ 13053-67. Расход воздуха на выходе не менее 1,2 м <sup>3</sup> /ч.
Реле трехмембранное пневматическое типа П1Р.3		Для реализации логических функций и коммутации непрерывных сигналов. В начальный момент мембранный блок находится в определенном положении под действием пружины.	Выходные пневматические сигналы - дискретные "0" или "1" по ГОСТ 13053-67. Расход воздуха на выходе не менее 1,2 м <sup>3</sup> /ч.
Реле универсальное пневматическое типа РУП-1М		Для реализации логических функций и коммутации непрерывных сигналов. Мощный выходной сигнал.	Выходные пневматические сигналы - дискретные "0" или "1" по ГОСТ 13053-67. Расход воздуха на выходе не менее 5 м <sup>3</sup> /ч.

Продолжение прилож. 4

Название и тип элемента	Конструкция элемента	Назначение элемента	Характеристики элемента																							
Дроссель регулируемый типа П2Д.2М		Для создания настраиваемого перепада давлений.	<p>Рабочий диапазон изменения входных сигналов 0 - 0,14 МПа. Диапазон настройки расхода воздуха 0,04 - 250 л/ч</p> <table border="1" data-bbox="1050 1487 1441 1809"> <thead> <tr> <th>Модификация дросселя</th> <th colspan="2">Размер капилляра, мм</th> <th>Расход, 10<sup>6</sup>, м<sup>3</sup>/с ±10 %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>П2Д.4-1</td> <td>0,18</td> <td>20</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>П2Д.4-2</td> <td>0,30</td> <td>20</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>П2Д.4-3</td> <td>0,18</td> <td>7</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>П2Д.4-4</td> <td>0,50</td> <td>20</td> <td>62</td> </tr> </tbody> </table>				Модификация дросселя	Размер капилляра, мм		Расход, 10 <sup>6</sup> , м <sup>3</sup> /с ±10 %	П2Д.4-1	0,18	20	6	П2Д.4-2	0,30	20	18	П2Д.4-3	0,18	7	7	П2Д.4-4	0,50	20	62
Модификация дросселя	Размер капилляра, мм		Расход, 10 <sup>6</sup> , м <sup>3</sup> /с ±10 %																							
П2Д.4-1	0,18	20	6																							
П2Д.4-2	0,30	20	18																							
П2Д.4-3	0,18	7	7																							
П2Д.4-4	0,50	20	62																							
Сопротивление регулируемое типа П2Д.1М		Для создания настраиваемого перепада давлений.	<p>Рабочий диапазон изменения входных сигналов 0 - 0,14 МПа. Диапазон настройки расхода воздуха 0,04 - 250 л/ч.</p>																							

			Невоспроизводимость установки расхода воздуха по шкале не более 10% от номинального значения установленного расхода
Задатчики типов П23Д.3 и П23Д.3П		Для установки местного задания в узлах и блоках средств пневмоавтоматики	Выходной сигнал имеет малую мощность и подается в непроточные камеры элементов в пределах одной платы или одного прибора. Расход в выходной линии не допускается. Питание подается через сопротивление П2Д.4-2.

Продолжение прилож. 4

Название и тип элемента	Конструкция элемента	Назначение элемента	Характеристики элемента
Пневмоповторитель с мощным выходом типа П2П.7		Для точного повторения пневматического аналогового сигнала с одновременным усилением по мощности.	Класс точности 0,5. Порог чувствительности не более 0,1 % от рабочего диапазона изменения выходного сигнала. Расход воздуха питания более 0,08 м <sup>3</sup> /ч. Расход воздуха на выходе не менее 1,5 м <sup>3</sup> /ч. Дополнительная погрешность, вызванная отклонением температуры окружающего воздуха от 20 ± 2 °С на каждые 10 °С, не более 0,3 %.
Пневмоповторитель - усилитель мощности типа П2П.3		Для выдачи усиленного по мощности пневматического сигнала, равного по давлению входному сигналу.	Порог чувствительности не более 0,3 % от рабочего диапазона изменения выходного сигнала. Расход воздуха питания не более 0,04 м <sup>3</sup> /ч. Расход воздуха на выходе не менее 1,5 м <sup>3</sup> /ч. Дополнительная погрешность, вызванная отклонением температуры окружающего воздуха от 20 ± 2 °С на каждые 10 °С, не более 0,6 %.

Элемент сравнения трехмембранный типа П2ЭС.1		Для сравнения двух изменяющихся по величине пневматических сигналов и формирования на выходе дискретных пневматических сигналов "0" и "1".	Класс точности 0,4. Рассогласование не более $\pm 0,00032$ МПа. Дифференциал не более 0,00064 МПа.
--	--	--	--

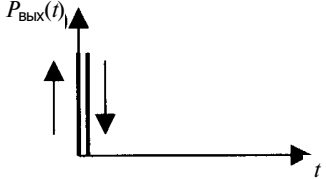
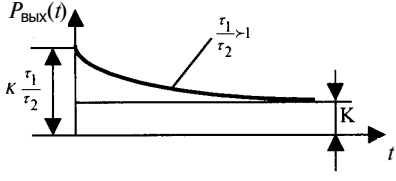
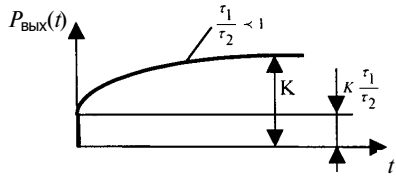
Продолжение прилож. 4

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

Продолжение прилож. 8

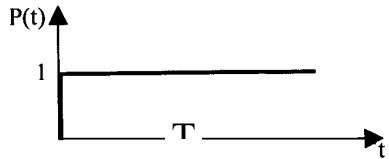
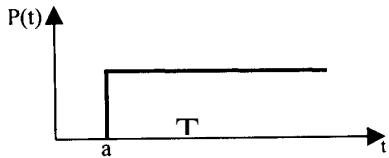
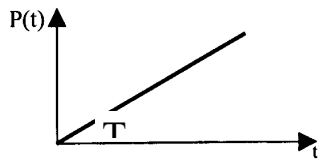
1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

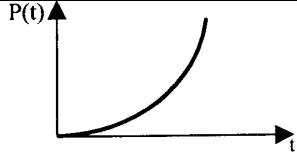
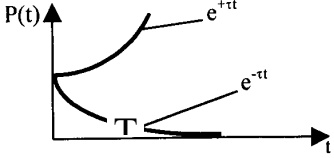
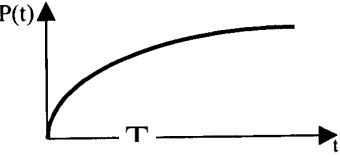


Дифференцирующее	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = \tau \frac{dP_{\text{ВХ}}(t)}{dt}$	$W(s) = \tau s$	$P_{\text{ВЫХ}}(t) = \delta(t)$	
Интегро-дифференцирующее	$\tau_2 \frac{dP_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + P_{\text{ВЫХ}}(t) = K \left( \tau_1 \frac{dP_{\text{ВХ}}(t)}{dt} + P_{\text{ВХ}}(t) \right)$	$W(s) = \frac{K(\tau_1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

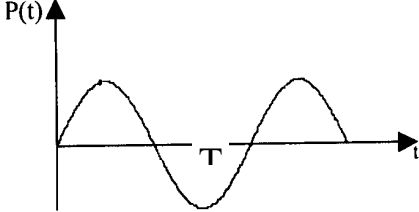
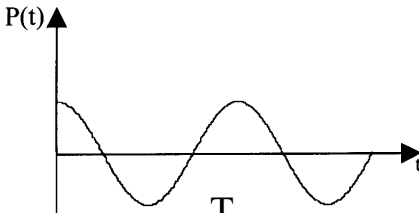
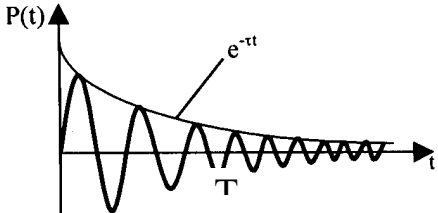
## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

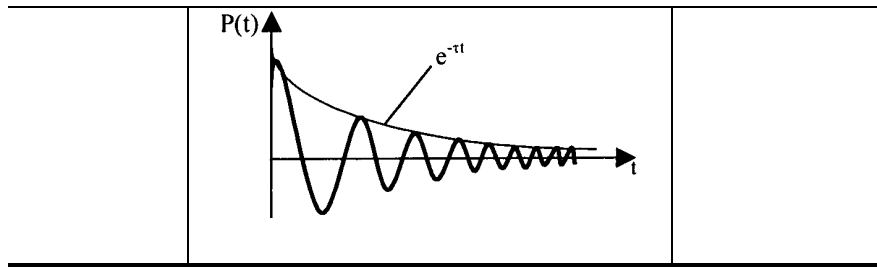
### Преобразование Лапласа для некоторых функций

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

		
$P(t) \pm \tau t$		$\frac{1}{s \pm \tau}$
$P(t) - e^{\pm \tau t}$		$\frac{1}{s(s + \tau)}$

Продолжение прилож. 5

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



## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

### Преобразование Лапласа для типовых математических операций

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

**Виды соединения звеньев**

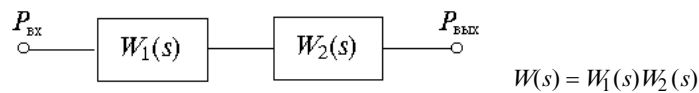
Динамической структурной схемой или просто структурной схемой системы автоматического регулирования называют схему, составленную из типовых динамических звеньев.

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

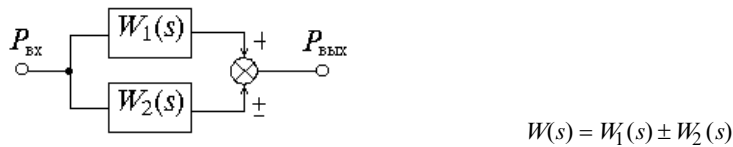
Обычно различают следующие типовые звенья: усилительное, инерционное, колебательное, интегрирующее, дифференцирующее, интегро-дифференцирующее, запаздывающее.

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

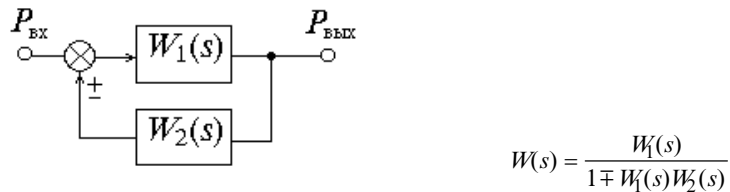
а)



б)



в)



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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ	ОБОЗНАЧЕНИЯ	3
.....		
ВВЕДЕНИЕ		4
.....		
...		
1	КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ	6
.....		
1.1	Элементы непрерывного действия	6
.....		
1.2	Элементы дискретного действия	10
.....		
1.3	Преобразователи	13
.....		
2	ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ	14
.....		
2.1	Пневматические камеры	14
.....		
2.2	Устройства запоминания и задержки пневматических сигналов	14
.....		
2.3	Импульсаторы	16
.....		
2.4	Генераторы	18
.....		
2.5	Триггеры с отдельными входами.....	20
2.6	Пневматические линейные пульсирующие сопротивления .....	21
3	ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ	26
.....		
3.1	Устройство для измерения вязкости газов	26
.....		
3.2	Устройство для измерения вязкости жидкостей	31
.....		
3.3	Устройство для измерения плотности жидкостей	35
.....		
3.4	Устройство для измерения скорости и количества выделяющихся газов	41
.....		
3.5	Устройство для измерения плотности сыпучих материалов .....	45
4	АНАЛИЗ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ВЕЩЕСТВ	51
.....		
.....		
4.1	Устройства из дросселирующих и накопительных элементов ....	51
4.2	Устройства с пневматическими операционными	57

усилителями	
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	67
.....	
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b>	68
.....	
Приложение 1. Аналогия электрических и пневматических цепей .....	69
Приложение 2. Основные физические свойства воздуха при нормальном давлении	71
.....	
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3. КОНСТРУКЦИИ ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ И УСТРОЙСТВ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ</b>	72
.....	
.....	
Приложение 4. Технические характеристики комплекса элементов УСЭППА	74
.....	
.....	
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАПЛАСА ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ФУНКЦИЙ .....</b>	81
Приложение 6. Преобразование Лапласа для типовых математических операций	83
.....	
Приложение 7. Виды соединения звеньев	84
.....	
Приложение 8. Характеристики типовых звеньев систем автоматического регулирования	85
.....	