При подаче в прибор давления (разрежения) свободный конец пружины перемещается и изменяет положение сердечника дифференциального трансформатора. При этом изменяется величина и фаза напряжения на вторичной обмотке трансформатора, которое подается на регистрирующий прибор.

Как правило, бесшкальные преобразователи типа МЭД работают в комплекте со вторичными регистрирующими приборами с дифференциально-трансформаторной схемой типов КСД, ДСР.

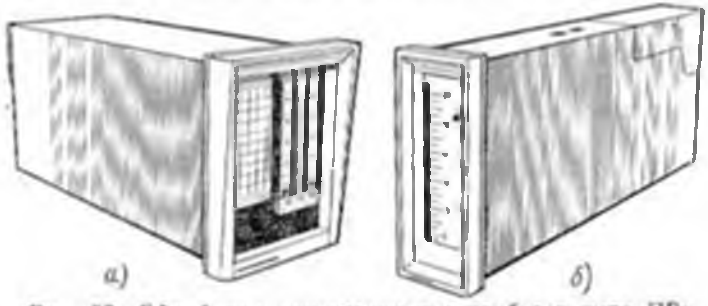


Рис. 90. Общий вид пневматических приборов типа ПВ:
а — на три параметра типа ПВ-10, *б* — на один измеряемый параметр типа ПВ-1

Пневматические вторичные приборы системы «Старт» (рис. 90) широко используют для работы с унифицированными аналоговыми пневматическими сигналами в пределах от 20 до 98 кПа (0,2—1,0 кгс/см²).

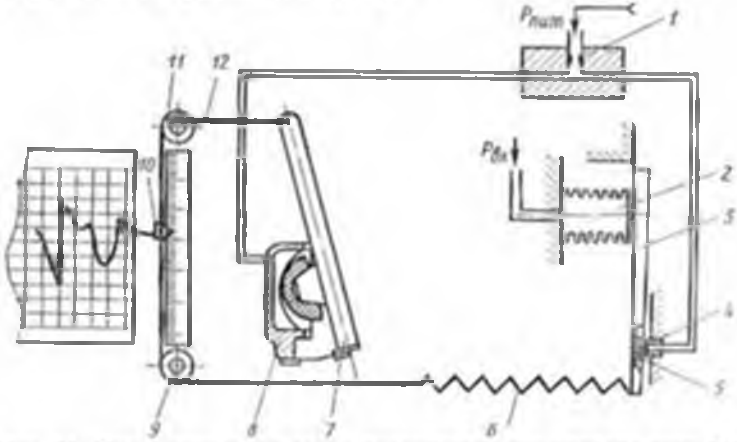


Рис. 91. Принципиальная схема пневматического прибора типа ПВ

Принципиальная схема вторичного пневматического прибора показана на рис. 91. Действие прибора основано на компенсационном принципе измерения, при котором усилие от входного давления $P_{вх}$ уравновешивается усилием устройства обратной связи.

Входное давление $P_{вх}$ воспринимается сильфоном *2*. Давление от источника питания через дроссель *1* попадает в линию сопла *4* и силового элемента *8*. С изменением входного давления $P_{вх}$ изменяется упругая деформация сильфона *2*, сильфон передвигает рычаг *3*, тем самым изменяя зазор сопло *4* — заслонка *5*.

При увеличении давления $P_{вх}$ заслонка *5* прикрывает сопло *4*, из которого постоянно выходит воздух в линию питания прибора. При этом возрастает давление в линии сопла и силовом элементе *8*. Вследствие этого чашечная мембрана силового элемента выгибается и отводит рычаг *7*. При изменении положения рычага *7* меняется положение кинематической связи лавсановой нити *12*, перекинутой через ролики *9*, *11* и закрепленной к спиральной пружине обратной связи *6*. Противоположный конец спирали связан с нижним концом рычага *3*.

При перемещении рычага *7* вправо (при увеличении давления) нить растягивает пружину *6*, наматывается на ролик и перемещает вверх указатель *10* с пером. При уменьшении входного давления рычаг *7* перемещается влево и указатель *10* перемещается вниз.

Шкалы прибора могут быть градуированы в зависимости от измеряемого параметра в величины давления, перепада давления, расхода и температуры.

§ 6. Электрические вакуумметры

При измерении вакуума в пределах $1 \cdot 10^{-7}$—$1 \cdot 10^{-1}$ Па применяют электрические вакуумметры трех типов: теплоэлектрические, ионизационные и магнитные.

Действие теплоэлектрического вакуумметра основано на зависимости теплопроводности газа от его давления. Прибор состоит из двух основных блоков: манометрического преобразователя (лампы) и измерительного электрического блока.

Манометрический преобразователь термопарного прибора ЛТ-2 показан на рис. 92, *а*. Он представляет собой стеклянный баллон, в котором расположены находящиеся в тепловом контакте платиновый проводник-подогреватель и хромель-копелевая термопара. Лампа работает в режиме постоянного тока подогревателя. С изменением измеряемого давления меняется теплопроводность и термо-э. д. с. термопары. Термо-э. д. с. термопары и измеряемый вакуум связаны между собой градуировочной кривой, изображенной на рис. 92, *в*.

Действие ионизационных вакуумметров основано на использовании электрического разряда, т. е. движения заряженных частиц в вакууме. Манометрический преобразователь ионизационного прибора ЛМ-2 изображен на рис. 92, *б*. Вдоль оси стеклянного баллона расположен U-образный катод из вольфрамовой проволоки, вокруг которого установлен анод в виде редкой сетки из молибденовой проволоки, подогреваемой электрическим током. Анод окружен ионным коллектором, который выполнен из тонкой никелевой фольги в форме круглого цилиндра.

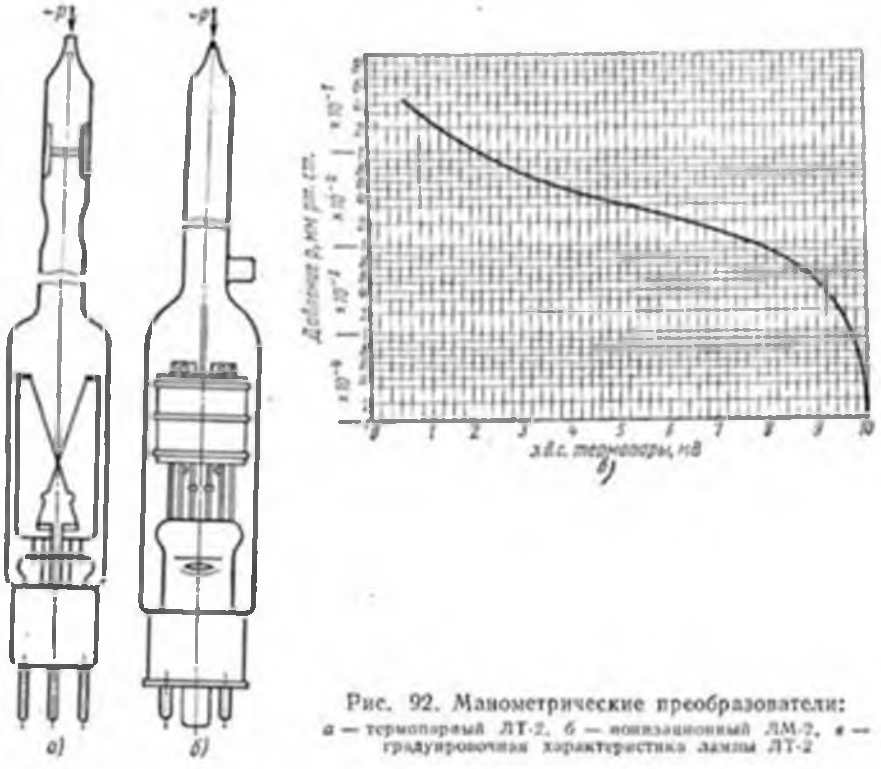


Рис. 92. Манометрические преобразователи:
а — термопарный ЛТ-2, *б* — ионизационный ЛМ-2, *в* — градуировочная характеристика лампы ЛТ-2

Измерительный блок обеспечивает необходимый режим лампы, а ток в цепи ионного коллектора является мерой давления.

Дальнейшее понижение предела измерений вакуума возможно благодаря применению инверсно-магнетронного манометрического преобразователя (рис. 93). Преобразователь имеет катод *1*, представляющий собой цилиндр *2* с торцовыми плоскостями, и анод *3*, который проходит по оси цилиндра через отверстия в торцовых поверхностях катода. Вся система, заключенная в герметичный корпус, помещается в постоянное магнитное поле магнита *4*, которое направлено по оси цилиндра катода. На анод подается высокое напряжение, равное 6 кВ. Под действием магнитного и электрического полей электрон, покинувший поверхность катода, сталкивается с молекулой газа и производит ее ионизацию, т. е. ток ионизации является мерой давления.

Электрический магнитный блокировочный вакуумметр ВМБ-8 (рис. 94) предназначен для измерения давления в пределах $1 \cdot 10^{-7}$—$1 \cdot 10^{-1}$ Па, а также используется в качестве датчика автоматики в автоматизированных вакуумных системах. Прибор состоит из инверсно-магнетронного манометрического преобразователя *1* ММ-32-1, измерительного блока *4* БИВ-1, соединителя *3* и термостойкого соединителя *2*.

Принцип работы прибора заключается в том, что манометрический преобразователь преобразует сигнал давления в сигнал постоянного тока. Разрядный ток преобразователя, пропорциональный измеряемому давлению, поступает на измерительный блок. Измерительный блок состоит из следующих элементов: источника

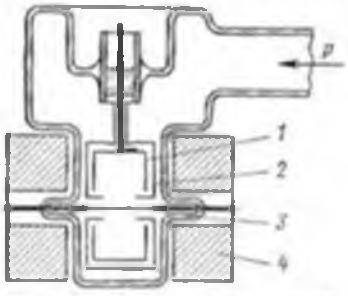


Рис. 93. Инверсно-магнетронный преобразователь ММ-14

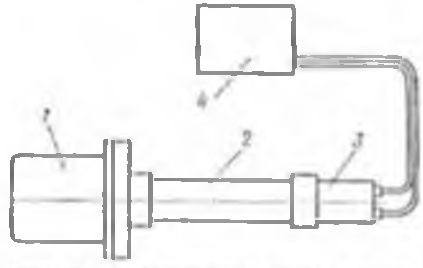


Рис. 94. Структурная схема магнитного вакуумметра ВМБ-8

питания, логарифмического устройства *УЛ*, усилителя постоянного тока *УПТ*, измерительного прибора *ИП1*, устройства сигнализации неисправности блока *УС*, двух устройств блокировок *УБ*.

Источник питания обеспечивает режим работы манометрического преобразователя (на анод подается высокое напряжение 2500 В) и всех остальных устройств измерительного блока.

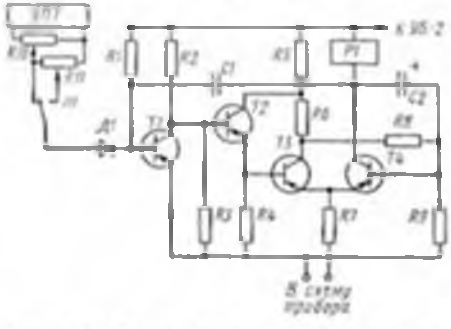


Рис. 95. Схема блокировочного устройства вакуумметра ВМБ-8

В связи с тем, что прибор работает в широком интервале измеряемых давлений без переключателя диапазонов, в нем предусмотрено логарифмическое устройство, которое преобразует разрядный ток манометрического преобразователя в напряжение, изменяющееся по логарифмическому закону. За счет этого устройства весь широкий диапазон измеряемых давлений укладывается в показания измерительного прибора *ИП1*, имеющего 100 делений шкалы. Отсчет давления производится по градуировочной характеристике, показывающей зависимость показаний измерительного прибора от давления.

Два устройства блокировок *УБ* предназначены для автоматической сигнализации заданных значений давлений при использовании прибора в качестве датчика автоматики в автоматизированных вакуумных системах. Блокировочное устройство *УБ* (рис. 95) работает следующим образом. При увеличении разрядного тока манометрического преобразователя увеличивается напряжение на

выходе усилителя постоянного тока *УПТ*. Если напряжение с выхода усилителя превысит величину опорного напряжения, заданного потенциометром *R11*, то разность этих напряжений через замкнутый контакт исполнительного реле *P1* поступает на базу транзистора *T1* и «запирает» его. Токовый сигнал в цепи эмиттер — коллектор транзистора *T1* переводит транзисторы *T2* и *T3* в открытое состояние и «запирает» транзистор *T4*. Так как коллекторный ток «запертого» транзистора *T4* практически равен нулю, то исполнительное реле *P1* обесточивается и перекидывает свой контакт в цепи выхода усилителя постоянного тока *УПТ*.

Если величина напряжения на выходе усилителя меньше величины опорного напряжения, заданного потенциометром *R10*, то диод *Д1* «запирается», при этом транзистор *T1* переходит в открытое насыщенное состояние, транзисторы *T2* и *T3* закрываются, а транзистор *T4* открывается. Под действием коллекторного тока транзистора *T4* исполнительное реле *P1* срабатывает и перекидывает свой контакт в цепи выхода *УПТ*. Исполнительные контакты сигнализации значений давлений от реле *P1* обоих устройств блокировок выведены на выходной блок зажимов прибора.

§ 7. Сигнализаторы давления

Любой компрессор, паровой котел и сосуд высокого давления имеют допустимую величину рабочего давления, превышение которого может привести к аварии, взрыву и выводу оборудования из строя. В связи с этим такое оборудование имеет автоматическую защиту, позволяющую производить «сброс» предельного давления или останов предаварийного оборудования.

Для этих целей используются сигнализаторы давления, которые по типу чувствительного элемента подразделяются на четыре основных типа: пружинные, поршневые, мембранные, сильфонные.

Пружинные и поршневые сигнализаторы используют при давлении 2,5—60 МПа (25—600 кгс/см²), сильфонные и мембранные — при 0,02—0,25 МПа (0,2—2,5 кгс/см²).

Электроконтактный манометр типа ЭКМ (ВС-16 рб) по принципу действия и устройству подобен обычному манометру с одновитковой пружиной. Сигнальное устройство прибора (см. рис. 81) имеет два установочных контакта: минимальный (нижний) и максимальный (верхний), которые замыкаются с подвижным контактом, установленным соосно с измерительной стрелкой прибора. Установочные контакты с помощью штифта, расположенного на лицевой части прибора, могут перемещаться на соответствующее задание.

В мембранных сигнализаторах давления типов ДТ, ДН и СПДМ в качестве чувствительных элементов используется эластичная мембрана, выполненная из прорезиненной ткани. На рис. 96, *а* показано устройство сигнализатора давления типа ДН. Плоская мембрана *2* связана со штоком *1*, который при изменении контролируемого давления, поступающего через штуцер *4* в полость

датчика *3*, замыкает или размыкает контакты микропереключателя *6*, установленного на корпусе сигнализатора. Настройка диапазонов срабатывания производится с помощью противодействующей пружины *5*.

Сильфонные сигнализаторы давления типов РД, ДД имеют бо́льшую чувствительность по сравнению с вышеописан-

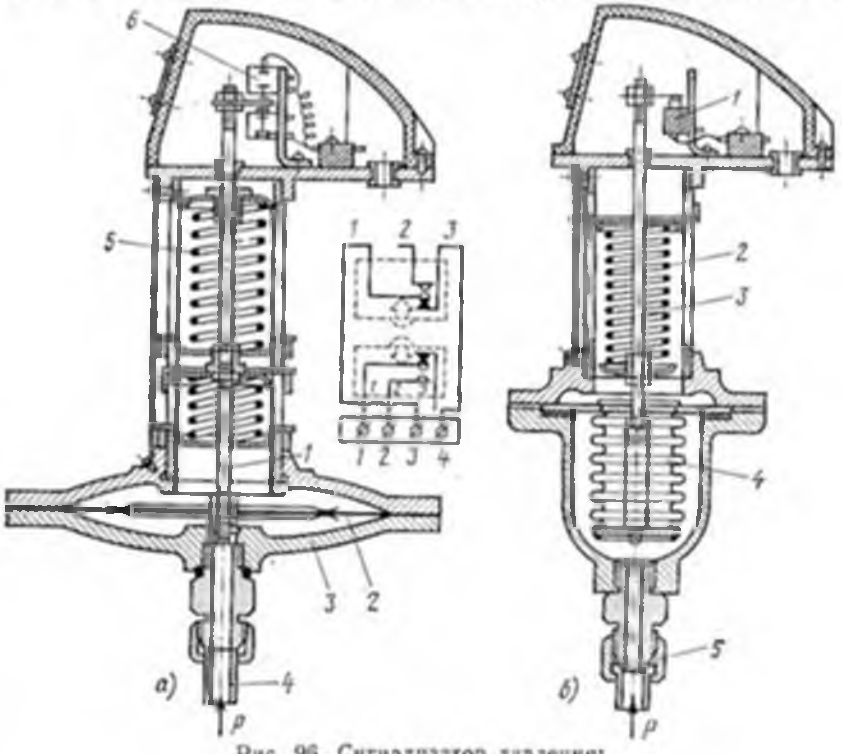


Рис. 96. Сигнализатор давления:
а — типа ДН, *б* — типа ДД

ными типами сигнализаторов, так как чувствительными элементами таких сигнализаторов являются сильфоны.

Приборы типа ДД (датчик давления), подобно датчикам типов ДН и ДТ, состоят из трех унифицированных узлов — чувствительного элемента, пружинного задатчика и переключающего устройства.

На рис. 96, *б* показано устройство сильфонного прибора типа ДД. При повышении давления контролируемой среды, поступающего через штуцер *5*, сильфон *4* деформируется, преодолевает усилие противодействующей пружины *2* задатчика и толкателем *3* переключает микропереключатель *1*.

В зависимости от модификации сигнализатор типа ДД используется в диапазоне давлений от 0,006 до 1,6 МПа (0,06—16 кгс/ см²).

Реле давления РД-12 (рис. 97) предназначается для контроля и сигнализации давлений в технологических установках.

Чувствительным элементом прибора является сильфон *2*. Кроме механизма настройки давления срабатывания реле имеет механизм настройки дифференциала. Принцип действия прибора основан на уравновешивании силы давления, действующей на сильфон *2*, силой упругих деформаций регулировочной пружины *14*.

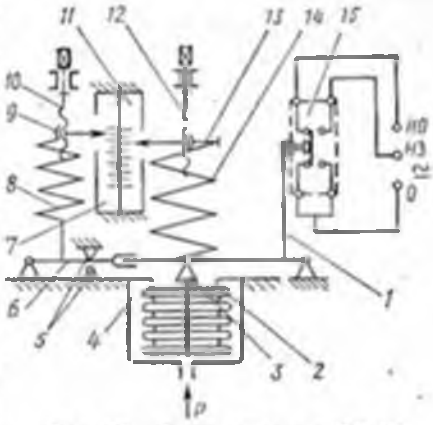


Рис. 97. Реле давления РД-12:
1, 6 — рычаги, *2* — сильфон, *3* — толкатель, *4* — корпус, *5* — ось, *7* — шкала, *8*, *14* — пружины, *9* — указатель, *10* — винт дифференциала, *11* — шкала задания, *12* — винт задания, *13* — указатель задания, *15* — микропереключатель

При повышении измеряемого давления *P* сильфон *2* деформируется (разжимается) и преодолевает сопротивление пружины *14*. Когда давление *P* достигнет заданного давления (шкала *11*), рычаг *1* переключит контакты микропереключателя *15*.

При понижении давления *P* на величину дифференциала, заданного по шкале *7* пружиной *8*, рычаг *1* произведет обратное переключение микропереключателя *15*.

Основные выводы

1. В местном контроле давлений газов и жидкостей наиболее широко используют технические манометры типов ОБМ, МОШ, МТ и т. д.

2. Сигнализаторы давлений типов ДН, ДТ, РД, ЭКМ просты и надежны в эксплуатации, поэтому они широко применяются в защите технологического оборудования.

3. В схемах автоматики технологических процессов, на щитах и пультах для контроля и сигнализации контролируемых давлений, как правило, используют различные преобразователи системы ГСП в комплекте с регистрирующими приборами.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип действия напоромера типа НМ-П; каково назначение мембранной коробки?
2. Определите, что произойдет с показаниями прибора типа МСС при перестановке тяги в верхнее отверстие поводка.
3. Будет ли работать пневматический прибор системы «Старт» при обрыве лавсановой нити?
4. Поясните работу сигнализатора давления типа ДН; каково назначение мембраны?

5. Определите, с помощью каких винтов устанавливается давление «задания» и «дифференциал срабатывания» реле типа РД-12.

6. Какое соотношение связывает абсолютное, избыточное и атмосферное давления?

7. В чем заключается принцип пружинного манометра?

После усвоения материала главы и ответа на контрольные вопросы можно приступить к решению задач.

Задача № 5

Манометр с пределом измерения 0—1 кгс/см² показывает незначительное давление, близкое к нулю; снять показания практически невозможно.

1. Каким прибором можно замерить такое малое давление?

2. Если выбранный Вами прибор показал давление, равное 800 мм вод. ст., как это выразить в кгс/см²?

Задача № 6

Манометром требуется измерить давление технической воды в пределах 3—4 кгс/см² с точностью 1,5 %.

1. Как правильно выбрать манометр для этих целей и каков должен быть его предел измерения?

2. Каков должен быть класс точности манометра?

Задача № 7

Манометр, измеряющий давление пара, установлен ниже точки отбора давления на 10 м и имеет показания 8 кгс/см². Удельный вес конденсата при $t=20°C$ $\gamma=1000$ кгс/см³. Определить действительное значение давления пара P_a.

Задача № 8

Определить предельную высоту установки манометра над местом отбора давления при измерении давления масла в пределах 0,5 кгс/см², а также определить показания прибора, соответствующие заданному значению 0,5 кгс/см². Удельный вес при $t=20°C$ $\gamma=800$ кгс/м³.

ГЛАВА VI
ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

§ 1. Единицы измерения расхода. Классификация приборов

Измерения расходов и количества газов и жидкостей имеют большое значение в самых различных областях науки и техники. Без правильного определения расходов компонентов невозможно провести качественные технологические процессы в химической, энергетической, бумажной и других отраслях промышленности.

Поток жидкости или газа количественно характеризуется средней скоростью и расходом.

Расходом называется количество газа или жидкости, протекающее через поперечное сечение трубопровода в единицу времени.

В СИ расход может быть объемный Q, выражаемый в м³/с, или массовый M, выражаемый в кг/с. Внесистемной единицей измерения расхода является литр в секунду (л/с).

Массовый и объемный расходы связаны между собой зависимостью $M=Q\rho$, где ρ — плотность газа или жидкости.

Средней скоростью потока называется отношение объемного расхода к площади поперечного сечения потока: $v_{ср}=Q/F$, где Q — объемный расход газа (жидкости), F — площадь поперечного сечения потока.

Физически $v_{ср}$ представляет собой постоянную во всех точках сечения величину скорости потока, однако вследствие влияния сил вязкости скорость по сечению потока распределяется неравномерно. Максимальную скорость имеет поток в центре сечения. При удалении от центра скорость потока уменьшается до нуля у стенок трубы.

Потоки делятся на установившиеся и неустановившиеся, ламинарные (безвихревые) и турбулентные (вихревые). В установившемся потоке средняя скорость и расход жидкости в сечении потока не меняются во времени. Если средняя скорость и расход жидкости в сечении потока изменяются во времена, то такой поток называется неустановившимся.

Расходомеры, применяемые для измерения расхода жидкостей и газов, подразделяются на следующие типы: тахометрические счетчики, работающие по принципу измерения частоты вращающихся частей прибора, находящихся в потоке измеряемой среды; расходомеры постоянного перепада давления, воспринимающие рабочим телом (поплавком) гидродинамическое давление измеряемого потока среды; расходомеры переменного перепада давления, воспринимающие перепад давления на сужающем устройстве, установленном в измеряемом потоке; индукционные расходомеры, работающие на принципе измерения электродвижущей силы (э. д. с.), индуктированной в магнитном поле при протекании потока жидкости; ультразвуковые расходомеры, работающие на принципе измерения скорости распространения ультразвука в измеряемом потоке.

Кроме данных типов расходомеров внедряются новые типы расходомеров: массовые турборасходомеры и расходомеры, работающие на принципе ядерно-магнитного резонанса.

§ 2. Тахометрические приборы

Тахометрические (или турбинные) расходомеры относятся к наиболее точным приборам для измерения расхода жидкости. Погрешность этих приборов составляет 0,5—1,0%. К преимуществам приборов данного типа относятся простота конструкции, высокая чувствительность, возможность измерений больших и малых расходов. Существенными недостатками таких приборов являются износ опор и необходимость индивидуальной градуировки с помощью градуировочных расходомерных установок.

К основным элементам прибора относятся тахометрический датчик (ротор) и отсчетное устройство. Принцип действия прибора основан на суммировании за определенный период времени числа оборотов помещенного в поток вращающегося ротора, частота которого пропорциональна средней скорости протекающей жидкости, т. е. расходу.

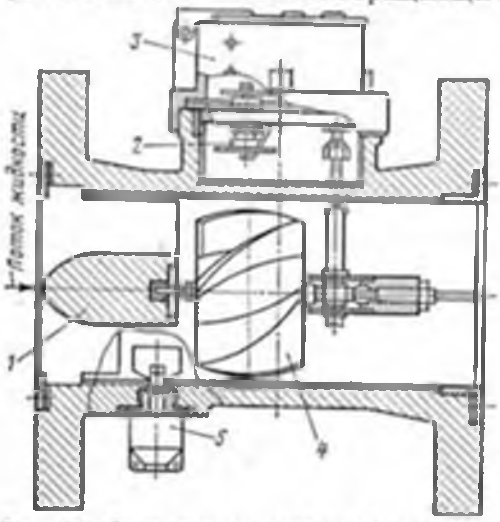


Рис. 98. Счетчик воды турбинный типа ВТ

Счетный механизм расходомера связан с помощью редуктора с тахометрическим ротором. По счетному устройству определяется значение расхода.

Расходомеры (скоростные счетчики жидкости) характеризуются нижним и верхним пределами измерения и номинальным расходом. Нижний предел измерения есть минимальный расход, при котором прибор дает показания с допустимой погрешностью. Верхний предел измерения есть максимальный расход, при котором обеспечивается кратковременная работа счетчика (не более одного часа в сутки). Номинальный расход есть максимальный длительный расход, при котором обе-

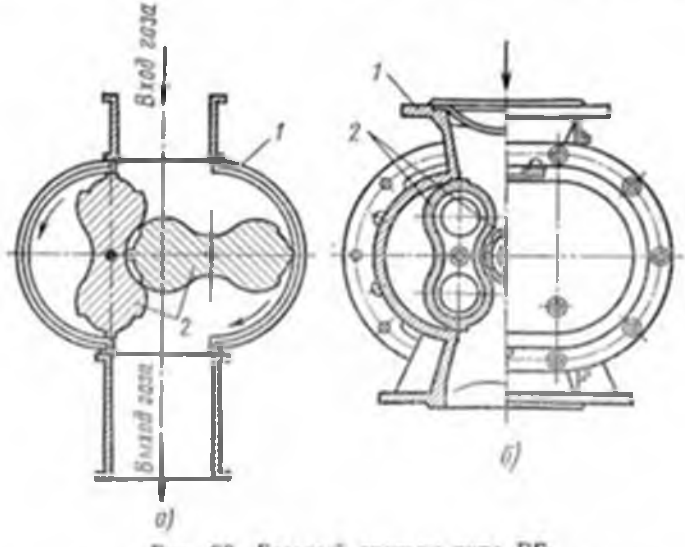


Рис. 99. Газовый счетчик типа РГ:
а — схема, *б* — общий вид; *1* — корпус, *2* — вращающиеся роторы

спечивается допустимая погрешность, а потеря давления не создает усилий, приводящих к быстрому износу трущихся деталей.

Наиболее распространенными типами таких счетчиков являются счетчики типов ВК, УВТ и расходомеры бензина, толуола и ацетона типа ШЖУ. На рис. 98 показан счетчик воды турбинный ВТ с горизонтальной вертушкой. Поток жидкости при входе в прибор выравнивается струевыпрямителем *1* и направляется на лопатки вертушки *4*, представляющей собой многозаходный винт. Червячной парой *5* и передаточным механизмом *2* вращение вертушки передается счетному устройству *3*.

Для измерения расходов очищенных горючих газов применяют ротационные объемные газовые счетчики типа РГ (рис. 99), которые работают при температуре газа в пределах 0—50°С и давлении до 100 кПа (1 кгс/см²). Наименьший расход, измеряемый счетчиком, составляет 10% от номинального расхода. Счетчик состоит из корпуса, вращающихся двухлопастных роторов, передаточного и счетного механизмов.

Под действием разности давлений газа на входе и выходе прибора роторы *2* приводятся во вращение и обкатываются боковыми поверхностями.

Принцип действия объемных ротационных счетчиков основан на суммировании единичных объемов газа V_0, вытесненных роторами из измерительной камеры прибора за определенный период времени. За один оборот два ротора вытесняют объем газа V_0. Частота вращения N роторов за определенный период времени фиксируется счетным механизмом.

Следовательно, формула для измерения объема газа V, прошедшего через прибор, будет иметь вид $V = V_0 N$.

Газовые счетчики типа РГ в зависимости от модификации выпускают на расходы 40, 100, 250, 400, 600 и 1000 м³/ч. Погрешность показаний в пределах 10—100% номинального расхода составляет ±2%.

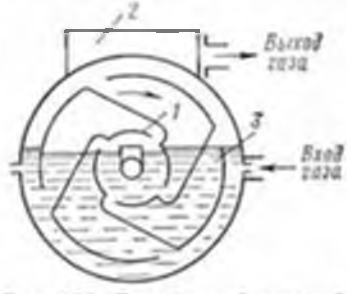


Рис. 100. Барабанный газовый счетчик типа ГСБ

Для точного измерения малых расходов газов и проверки приборов обтекания применяются барабанные газовые счетчики типа ГСБ (рис. 100). Основными элементами счетчика являются барабан *1* с четырьмя равными измерительными камерами и счетный механизм *2*. Металлический барабан погружен в затворную жидкость *3*. Под действием разности давлений газа на входе и выходе счетчика барабан вращается, при этом газ вытесняется жидкостью из камер барабана. Полный объем барабана равен суммарному объему всех четырех камер. С помощью счетного механизма определяется расход измеряемого газа. Барабанные счетчики имеют погрешность ± (0,2—1)%. Необходимыми условиями правильной работы счетчика

являются: строго определенная высота уровня затворной жидкости (воды); строгая горизонтальность прибора по установленному уровню.

§ 3. Приборы постоянного перепада

Расходомеры обтекания, относящиеся к расходомерам постоянного перепада давления, нашли широкое применение в измерении расходов газов и жидкостей.

Название приборов (расходомеры обтекания) связано с тем, что рабочая среда (газ или жидкость) обтекает чувствительный элемент прибора — поплавок.

Расходомеры обтекания имеют: высокую чувствительность; малую стоимость, незначительные потери давления; простоту конструкции и эксплуатации; возможность использования при измерении агрессивных жидкостей и газов, а также в тех случаях, когда невозможно использовать другие приборы измерения расхода.

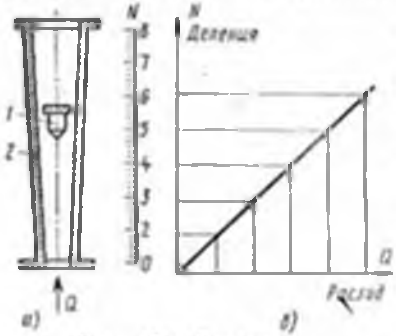


Рис. 101. Ротаметр:
а — общий вид, *б* — расходная характеристика прибора

Наиболее распространенным типом такого расходомера является ротаметр (рис. 101), который имеет расширяющуюся коническую трубку *2* и поплавок *1*. Шкала стеклянных ротаметров имеет 100 делений, а ротаметры с электрическим и пневматическим выходным сигналом имеют дополнительно вторичные приборы для определения расхода.

В зависимости от пределов измерений поплавок изготовляют из эбонита, дюралюминия или нержавеющей стали. По типу поплавок выполняется цельным или облегченным. Поплавок имеет нижнюю коническую часть, среднюю цилиндрическую и верхнюю со скошенным бортиком и направляющими канавками, которые служат для придания вращательного движения поплавку, центрирующего его в измеряемом потоке.

Принцип действия ротаметров состоит в том, что гидродинамическое давление измеряемого потока среды воздействует снизу на поплавок и вызывает его вертикальное перемещение. Под действием перемещения поплавка из-за конусности трубки изменяется площадь проходного сечения между поплавком и трубкой, а перепад давления по обе стороны поплавка остается постоянным. Поэтому такие приборы называют расходомерами постоянного перепада давлений.

В установившемся режиме при определенном расходе масса поплавка уравновешивается динамическим давлением потока. Поплавок при этом занимает соответствующее положение относительно стеклянной трубки, открывая часть проходного сечения прибора.

Каждый ротаметр имеет паспорт, в котором дается градуировочная кривая, показывающая зависимость расхода от положения поплавка. Как правило, ротаметры тарируют по воде или воздуху. При использовании приборов для определения расхода других жидкостей и газов в градуировочную кривую вносят поправочный коэффициент, учитывающий плотность измеряемого газа или жидкости.

В настоящее время выпускают показывающие, стеклянные ротаметры РМ, ротаметры с пневматической передачей показаний РПД и ротаметры с электрической передачей показаний РЭД. В зависимости от измеряемых расходов ротаметры имеют ряд модификаций.

Ротаметры с дистанционной передачей показаний типа РЭД имеют дифференциально-трансформаторную катушку, плунжер которой жестко связан с поплавком ротаметра.

Ротаметры с пневмовыходом типа РПД имеют пневмопреобразователь со стандартным выходным пневматическим сигналом, который в зависимости от расхода измеряемого газа или жидкости формирует пневмосигнал от 20 до 100 кПа (0,2—1,0 кгс/см²).

Тарировку ротаметров на заводе проводят при температуре 20°С и давлении 100 кПа (760 мм рт. ст.).

Корпус ротаметра состоит из двух разборных частей, соединенных между собой стяжными стойками. Снизу и сверху прибор имеет фланцы для установки в технологические трубопроводы. Детали прибора, которые соприкасаются с рабочей средой, выполняют из нержавеющей стали.

Ротаметры всех типов и модификаций устанавливают в строго вертикальных участках трубопроводов при направлении потока снизу вверх. Рабочее давление измеряемой среды в зависимости от типа прибора составляет 0,6; 1,6; 6,4 МПа (6, 16 и 64 кгс/см²).

§ 4. Приборы переменного перепада

Для автоматического измерения расходов пара, газов и жидкостей используют различные типы расходомеров переменного перепада. Принцип действия таких приборов, объединенных общим методом измерений, основан на измерении перепада давления, образующегося в результате изменения скорости измеряемого потока на специальном сужающем устройстве, называемом диафрагмой.

Рассмотрим явления, возникающие при прохождении жидкости или газа через сужающее устройство, установленное в трубопроводе (рис. 102). При протекании жидкости или газа через сужающее устройство часть потенциальной энергии давления переходит в кинетическую энергию, при этом средняя скорость потока в суженном сечении повышается, а давление уменьшается. Таким образом при протекании газа или жидкости образуется разность давлений до и после сужающего устройства. Разность этих давлений (перепад давлений) зависит от скорости (расхода) протекающего вещества.

Величина перепада давлений измеряется специальными устройствами, называемыми дифференциальными манометрами.

При прохождении реальных измеряемых сред через сужающее устройство возникают дополнительно такие физические явления, как потери давления на вязкое трение, изменение плотности и др., которые соответствующим образом учитывают при расчетах сужающих устройств.

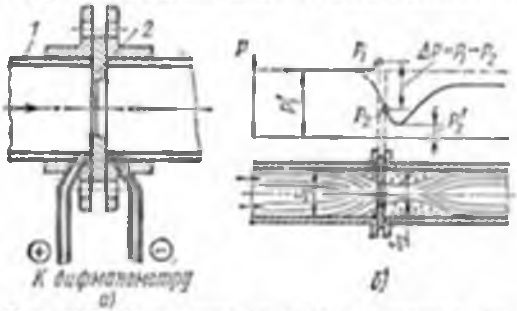


Рис. 102. Измерение расхода с помощью сужающего устройства:

а — диафрагма; *1* — трубопровод, *2* — сужающее устройство (диафрагма); *б* — распределение давления у сужающего устройства: P_1' — давление в сечении S_1, P_1 — давление перед диафрагмой, P_2' — давление в сечении S_2, P_2 — давление после диафрагмы, ΔP — перепад давления на диафрагме

К стандартным сужающим устройствам относятся диафрагмы, сопла и трубки Вентури. Наиболее распространенным типом сужающих устройств являются диафрагмы дисковые нормальные типа ДДН и диафрагмы камерные нормального типа ДКН.

Нормальная диафрагма представляет собой круглый металлический диск с центральным концентрическим отверстием, диаметр которого строго соответствует выполненному расчету стандартного сужающего устройства.

Диафрагма должна иметь острую прямоугольную кромку со стороны входа измеряемого потока жидкости или газа. К установке диафрагмы относительно оси трубопровода, остроте прямоугольной входной кромки и допуску диаметра диафрагмы предъявляются определенные требования: входная кромка диафрагмы не должна иметь следов затуплений, задиров и закруглений.

Допустимое отклонение от оси отверстия диафрагмы до оси трубы должно составлять не более 0,015 D (D/d — 1), где D — внутренний диаметр трубы, d — внутренний диаметр диафрагмы, мм.

Предельный допуск на внутренний диаметр диафрагмы в зависимости от расчетных данных составляет ± (0,001—0,005) мм.

Нормальные диафрагмы устанавливают на прямолинейном горизонтальном или вертикальном участке трубопровода для создания ламинарного потока в измеряемой среде. В зависимости от схемы технологических трубопроводов (наличие вентилей, задвижек, колен и закруглений участков трассы) определяют прямые участки до и после диафрагмы. Ориентировочно длина прямого участка должна составлять: до диафрагмы — не менее 10 диаметров трубопровода — 10D, после диафрагмы — не менее 5 диаметров трубопровода — 5D. Отборы «+» и «—» от камеры при измерении расходов жидкостей устанавливают сбоку перпендикулярно оси трубопровода для исключения погрешности измерений от воздушных «подушек».

В качестве материала диафрагм обычно используют нержавеющую сталь марки Х18Н9Т, устойчивую в условиях агрессивных сред. На верхнюю часть диафрагмы наносят паспортные данные и номер используемого дифференциального расходомера.

Во избежание дополнительной погрешности измерения перепада давлений центр отверстия диафрагмы должен строго лежать на оси трубопровода. Таким образом, для измерения расхода приборами переменного перепада давлений необходимо иметь: сужающее устройство для создания перепада давлений в измеряемом потоке; первичный датчик — дифференциальный манометр, измеряющий перепад на сужающем устройстве; импульсные соединительные линии, соединяющие сужающее устройство с дифференциальным манометром; вторичный измерительный прибор.

Отборы «+» и «—» от камеры при измерении расходов паров и газов устанавливают вверх перпендикулярно оси трубопровода, с тем чтобы исключить попадание конденсата (влаги) от паров (или газов), влияющего на точность измерений.

Все дифманометры переменного перепада для измерения расхода имеют неравномерную (квадратичную) шкалу в связи с существующей квадратичной зависимостью между перепадом давлений и расходом:

$$Q = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{(2/\rho)(P_1 - P_2)},$$

где Q — объемный расход, α — коэффициент, учитывающий отношение диаметров трубопровода и сужающего устройства и степень эжатия потока, ε — коэффициент, учитывающий изменение плотности потока при прохождении через сужающее устройство, ρ — плотность газа или жидкости, $P_1 - P$ — перепад давлений на диафрагме, F_0 — площадь внутреннего отверстия сужающего устройства.

§ 5. Дифференциальные расходомеры

Наиболее распространенными типами расходомеров переменного перепада давлений являются дифференциальные манометры следующих типов: поплавковые, сильфонные, мембранные, колокольные, пневматические.

Поплавковые дифманометры работают на принципе сообщающихся сосудов разных диаметров. Под действием перепада давлений, подведенного к обоим сосудам, изменяется уровень жидкости в дифманометре, что вызывает перемещение поплавка, находящегося в одном из сосудов.

Два сосуда соединены между собой трубкой и наполнены ртутью. При равенстве давлений в обоих сосудах ($P_1 - P_2$) уровни ртути в сосудах одинаковы.

В общем виде зависимость уровней ртути в сосуде от входного давления определяется выражением

$$H\gamma = P, \qquad (1)$$

где H — высота уровня ртути, γ — удельный вес ртути, P — входное давление; тогда из условий равновесия столбов ртути в сообщающихся сосудах можно записать

$$P_1 - P_2 = (H_1 + H_2)(\gamma - \gamma_1), \tag{2}$$

где γ — удельный вес ртути, γ_1 — удельный вес вещества, находящегося над ртутью.

Обозначим перепад давлений и высоту столба

$$P_1 - P_2 = P; \quad H_1 + H_2 = H; \tag{3}$$

преобразовав уравнение (2), имеем

$$\Delta P = H(\gamma - \gamma_1). \tag{4}$$

Объем ртути в сосудах при условии равновесия системы определяется как

$$(\pi D_1^2/4) H_1 = (\pi D_2^2/4) H_2, \tag{5}$$

где D_1 и D_2 — диаметры сосудов.

Определив из уравнения (5) значение H_2 и подставив его в уравнение (3), имеем

$$H = H_1(1 + D_1^2/D_2^2). \tag{6}$$

Подставив значение H из уравнения (6) в уравнение (4), получим

$$\Delta P = H_1(1 + D_1^2/D_2^2)(\gamma - \gamma_1). \tag{7}$$

Исходя из этого отношение диаметров D_1 и D_2 для определенного прибора постоянно: $1 + D_1^2/D_2^2 = K_1$, разница удельных весов $\gamma - \gamma_1$ для данного прибора постоянна, поэтому обозначаем $\gamma - \gamma_1 = K_2$, тогда уравнение (6) принимает вид $\Delta P = K_1 K_2 H_1$, *т. е. величина перепада давления ΔP определяется изменением уровня ртути H_1 в первом сосуде, что показывает принцип действия поплавковых дифференциальных манометров.*

На рис. 103, *а* показан бесшкальный дифманометр ДПЭМ-2. Прибор имеет измерительную систему и электрический датчик. Сосуды *1* и *2* соединены между собой и залиты маслом. В плюсовом сосуде *2* установлен поплавок *3*, плавающий на поверхности масла. С поплавком *3* соединен плунжер *5*, находящийся в индукционной катушке *4* электрического датчика. При изменении перепада давлений поплавок, следуя за изменением уровня масла, перемещается вверх или вниз, увлекая в том же направлении и плунжер.

Электрический датчик (рис. 103, *б*) имеет первичную обмотку *1*, питающуюся переменным током от силового трансформатора электронного усилителя вторичного прибора, и вторичную обмотку *2*, состоящую из двух секций, включенных навстречу друг другу. Под действием магнитного потока первичной обмотки во вторичной обмотке датчика индуктируется переменное напряжение, величина и фаза

которого зависят только от положения плунжера в катушке. Индуктированное переменное напряжение подается на электронный усилитель вторичного прибора, который определяет действительный расход измеряемой среды. Таким образом, каждому положению плунжера датчика, определяемого значением перепада давления, соответствует определенное положение показывающей стрелки расходомера.

Основными типами поплавковых дифманометров являются: показывающие приборы типа ДП (ДП-780, ДПМ-780), самопишущие приборы типа ДПМ (ДПМ-710, ДПМ-710Р и др.), с дистанционной передачей показаний типа ДПЭС. Данные типы приборов могут иметь сигнальное устройство, интегратор или пневмодатчик.

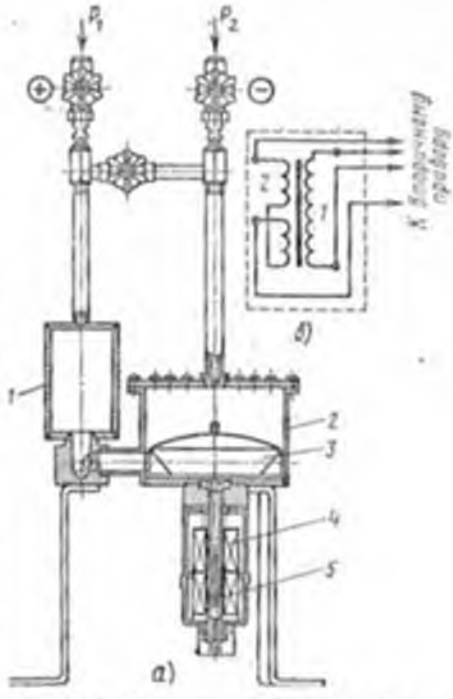


Рис. 103. Поплавковый расходомер типа ДПЭМ-2:
а — общий вид, б — схема датчика

В поплавковом дифманометре-расходомере типа ДП связь между перемещением поплавка и приводом измерительной стрелки осуществляется с помощью магнитной муфты.

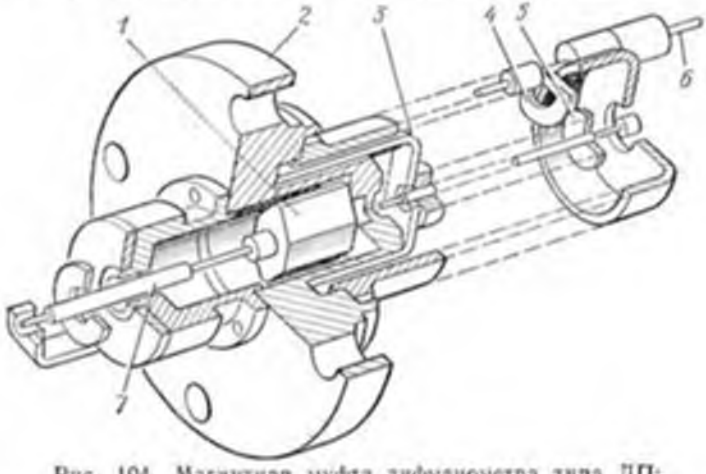


Рис. 104. Магнитная муфта дифманометра типа ДП:
1 — магнит, 2 — магнитопровод, 3 — стакан-разделитель, 4 — сектор, 5 — шестеренка, 6 — ось, 7 — выходная ось

Магнитная муфта (рис. 104) имеет магнитопровод *2*, постоянный магнит *1*, заключенный внутри немагнитного стакана *3*.

Линейное перемещение поплавка прибора преобразуется кинематической связью в угловое перемещение сектора *4*. При этом следящая шестерня *5* поворачивает на некоторый угол магнитопровод *2*.

Силы взаимодействия постоянного магнита *1* и магнитопровода *2* синхронно поворачивают магнит на угол, равный углу поворота магнитопровода.

Ось *7* постоянного магнита связана с квадратичным расходомерным лекалом, с помощью которого осуществляется запись измеряемого расхода. При максимальном перемещении поплавка, равном 35, 25 мм, выходная ось магнитной муфты поворачивается на угол 173°25′.

У дифманометров — расходомеров на выходную ось магнитной муфты устанавливают лекало, рассчитанное по квадратичной зависимости.

У дифманометров — перепадомеров и уровнемеров — вместо лекала устанавливается линейный сектор, так как зависимость перепада давления или уровня от перемещения поплавка прибора определяется линейной зависимостью: $y=kx$.

Дифманометры типов ДП-778 и ДП-778Р оснащены сигнальными устройствами, принцип действия которых основан на свойстве фоторезистора резко уменьшать свое внутреннее сопротивление при воздействии на него светового потока. При этом резко возрастает ток в цепи фоторезистора и полупроводниковый усилитель включает сигнальное реле.

Сигнальное устройство имеет три предела сигнализации: «Минимум», «Норма», «Максимум».

Максимальный и минимальный пределы сигнализации (или измерения) устанавливаются стрелками-задатчиками. При значении измеряемого параметра в заданном пределе горит лампочка желтого цвета «Норма». При достижении значения измеряемой величины, равной задатчику (максимум или минимум), открывается щель в шторке подсветки и световой поток лампы падает на фоторезистор, сигнал которого поступает в цепь усилителя. Срабатывает соответствующее реле и загораются лампы красного цвета «Максимум» или зеленого цвета «Минимум».

Электрическая схема сигнального устройства приборов типа ДП-778 показана на рис. 105.

Питание ~220 В подается на схему через разъем *Ш2*. Диодный мост *Д3—Д6* с конденсатором *С2* обеспечивает напряжение постоянного тока для сигнального блока, состоящего из двух электронных ключей, выполняемых на полупроводниковых триодах *ПП1 — ПП2*.

Нагрузкой триодов являются электромагнитные реле *Р1* и *Р2*.

Когда измеряемый параметр находится в норме, то шторка закрывает фоторезисторы *R1* и *R2* от световых потоков ламп подсветки *Л4, Л5*.

В таком положении транзисторы *ПП1* и *ПП2* заперты относительно эмиттеров положительным потенциалом, поступающим на базы транзисторов за счет падения напряжения на диоде *Д2*.

Так как транзисторы заперты, то коллекторный ток на обоих транзисторах практически отсутствует, поэтому обмотки реле *Р1*

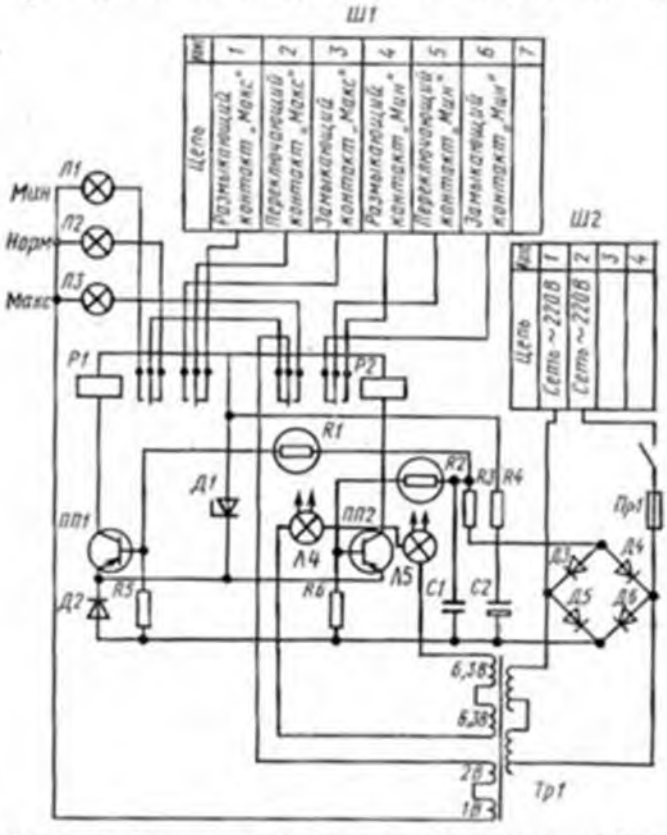


Рис. 105. Электрическая схема сигнального устройства расходомера типа ДП

и *Р2* обесточены и через их контакты проходит цепь сигнальной лампы желтого цвета *Л2* «Норма».

Если контролируемый параметр достиг предела, заданного стрелкой-задатчиком, шторка открывает световой поток осветительной лампы *Л4*, фоторезистор *R1* резко уменьшает свое внутреннее сопротивление. В результате этого увеличивается ток в цепи базы транзистора *ПП1*, транзистор открывается и срабатывает реле *Р1*. При этом контакты реле *Р1* включают сигнальную красную лампу *Л1* «Максимум» и одновременно замыкают исполнительные контакты на разъеме *Ш2*, которые используют в схеме автоматического управления или сигнализации.

Аналогично работает электрическая схема при достижении прибором минимального значения контролируемого параметра.

Сильфонные и мембранные дифманометры, имеющие небольшую инерционность и практически неограниченный верхний предел измерения, относятся к пружинным дифманометрам.

Чувствительными элементами таких дифманометров, воспринимающих перепад давлений, являются сильфоны и мембраны.

Принцип действия сильфонного дифманометра основан на уравновешивании измеряемого перепада давления силами упругих деформаций сильфонов. Для создания противодействующей силы сильфоны дополняются винтовыми пружинами. Практические схемы дифманометров, имеющих сильфонные блоки из двух сильфонов, соединенных между собой регулируемым дросселем — демпфером, сложнее приведенной схемы (рис. 106), по которой можно представить общий принцип действия прибора.

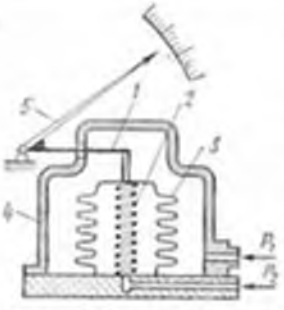


Рис. 106. Сильфонный дифманометр

Плюсовое большее давление P_1 подается в полость корпуса *4*, а минусовое, меньшее давление P_2 — внутрь сильфона *3*. Под действием перепада давлений сильфон деформируется, при этом перепад давлений уравновешивается силой упругой деформации сильфона и винтовой пружиной *2*. Деформация сильфона, являющаяся функцией перепада давлений, через рычажный механизм *1* преобразуется в перемещение измерительной стрелки *5* прибора.

В промышленных приборах типа ДС-IV сильфонный блок подобен описанному, однако ось блока связана с плунжером, который перемещается относительно индукционной катушки, включенной совместно с катушкой вторичного прибора в индукционную дифференциально-трансформаторную измерительную схему.

Основными типами сильфонных дифманометров являются: бесшкальные приборы типа ДС (ДС-П3, ДС-П4, ДС-П5), дифманометры сильфонные показывающие типа ДСП (ДСП-780, ДСП-778), дифманометры сильфонные самопишущие типа ДСС (ДСС-710, ДСС-712, ДСС-732).

Рабочий диапазон перепадов давления различных типов сильфонных дифманометров составляет от 40 до 0,63 МПа (400—6,3 кгс/см²).

Мембранные дифманометры типа ДМ (рис. 107) в качестве чувствительного элемента имеют мембранный блок, состоящий из двух сообщающихся между собой мембранных коробок *7* и *8*. Каждая мембранная коробка собрана из двух мембран, внутри которых находится дистиллированная вода. Перепад давления от сужающего устройства в камеры подводится через импульсные трубки *6* и *9*, на которых установлены запорные вентили *1* и *3*, вентиль *2* является уравнительным. В рабочем состоянии у дифманометра уравни-

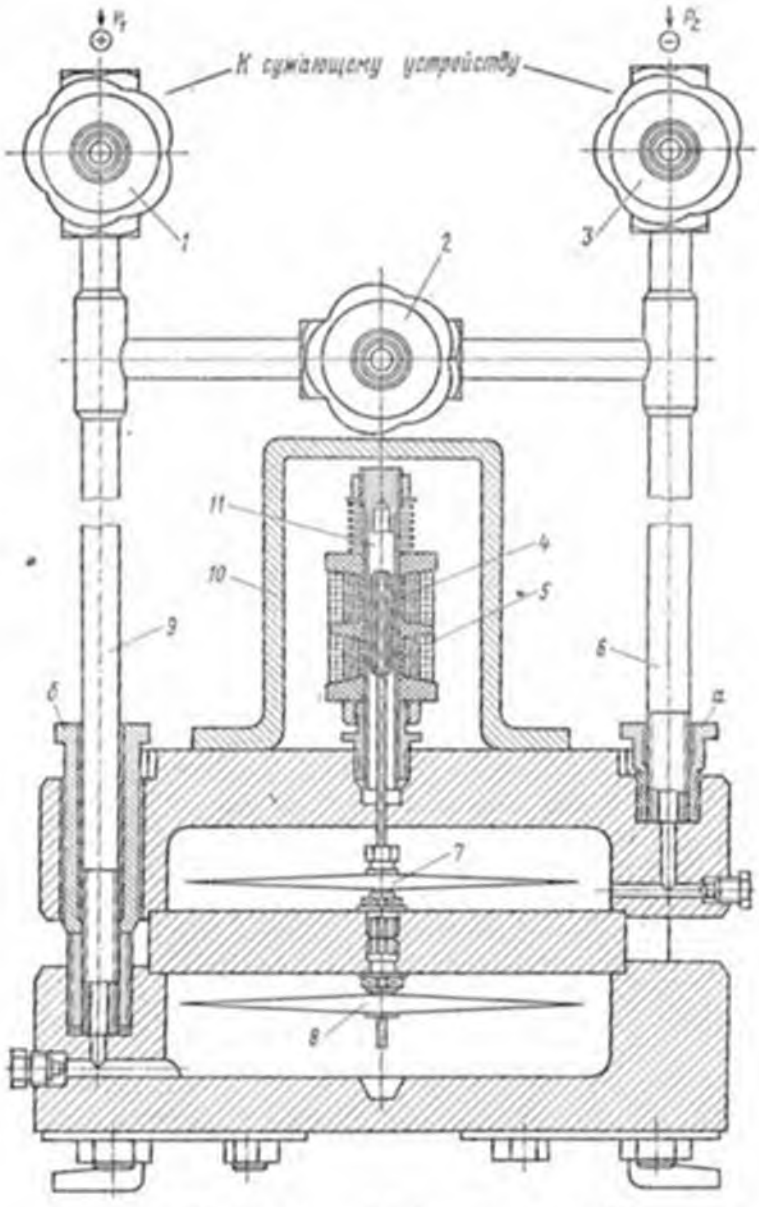


Рис. 107. Мембранный дифманометр типа ДМ:
1, 2, 3 — вентили, *4* — сердечник, *5* — катушка, *6, 9* — трубки, *7, 8* — мембранные коробки, *10* — кожух, *11* — трубка

тельный вентиль *2* находится в закрытом состоянии. С центром верхней мембраны связан сердечник *4* дифференциально-трансформаторного датчика.

Дифференциально-трансформаторный датчик представляет собой индукционную катушку *5* из двух обмоток, внутри которой помещен сердечник *4* из мягкой стали. Первичная обмотка датчика питается напряжением от вторичного электронного прибора. Под действием разности давлений нижняя мембранная коробка сжимается, жидкость из нее перетекает в верхнюю коробку, коробка увеличивается в объеме и перемещает вверх сердечник *4*. В результате этого во вторичной обмотке индукционной катушки изменяется напряжение и фаза выходного сигнала. Выходной сигнал в дальнейшем регистрируется вторичным электронным прибором — расходомером.

Деформация мембран происходит до момента уравновешивания сил, вызванных перепадом давлений и упругими силами мембранных коробок. Мембранные коробки в зависимости от рабочего перепада давлений имеют определенную расчетную жесткость.

Дифференциальные манометры типа ДМ разделяют на две группы: приборы невзаимозаменяемых моделей (ДМ-3577, ДМ-3566, ДМ-3564, ДМ-3537); приборы взаимозаменяемых моделей с унифицированными выходными параметрами (ДМ-3573, ДМ-3674, ДМ-3582, ДМ-3583), работающие в комплексе с вторичными самопишущими приборами типов КСД, ДСР и машинами централизованного контроля и регулирования.

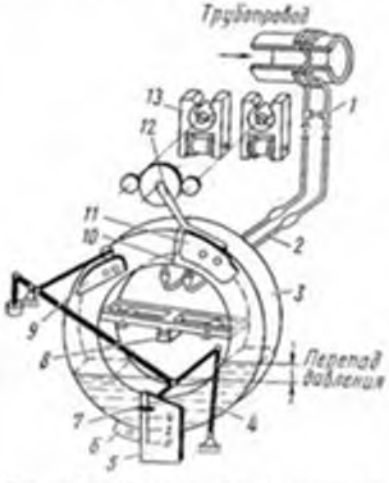


Рис. 108. Кольцевой дифманометр типа ДК-Ф:

1, 2 — трубки отборов, *3* — подвижное кольцо, *4* — связь, *5* — шкала, *6* — противовес, *7* — стрелка, *8* — опора, *9* — зеркало, *10* — перегородка, *11* — накладка, *12* — кронштейн, *13* — преобразователь

Кольцевой дифференциальный манометр типа ДК-Ф (рис. 108), работающий по методу переменного перепада давлений, применяется для измерения расхода и разности давлений неагрессивных газов и жидкостей. Отличительной особенностью кольцевых дифманометров является возможность их использования при измерении малых перепадов давлений. Чувствительным элементом прибора является заполненное до половины высоты рабочей жидкостью (трансформаторным маслом или водой) полое подвижное кольцо *3*, установленное на опоре *8*. В верхней части кольцо разделено перегородкой *10* на два отсека, в которые от камеры через импульсные трубки *2* подается измеряемый перепад давлений. В нижней части кольца укреплен груз — противовес *6*. Под действием перепада давлений жидкость, являющаяся гидравлическим затвором,

отделяющим плюсовую и минусовую полости кольцевой камеры, перемещается из камеры с большим давлением (плюсовой) в камеру с меньшим давлением (минусовую). При этом центр тяжести кольца изменяется, происходит его разворот на опоре *8* на определенный угол. *Угол поворота кольца определяется равенством момента вращения* $M_{вр}$, *создаваемого перепадом давлений и противодействующим моментам* $M_{пр}$ *груза — противовеса 6;* $M_{вр}=M_{пр}$.

Передаточный механизм преобразует угловое перемещение кольца в перемещение стрелки показывающего прибора.

В целом ряде приборов, в том числе и в приборе ДК-Ф, поворот кольца через передаточный механизм преобразуется в поворот рамок ферродинамических преобразователей, принцип действия которых описан ниже.

Приборы типов ДК, ДК-Ф имеют высокую точность измерений, их показания не зависят от плотности рабочей жидкости и температуры окружающей среды. Максимальный измеряемый перепад давлений составляет 250 мм рт. ст.

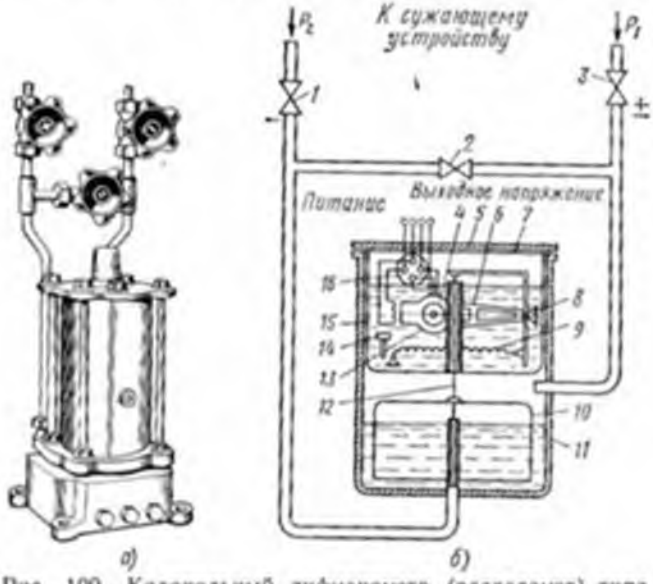


Рис. 109. Колокольный дифманометр (расходомер) типа ДКО:

а — общий вид, б — схема: 1, 2, 3 — вентили, 4 — шестерня, 5 — рычаг, 6 — сектор, 7 — крышка, 8 — ось, 9 — пружина, 10 — колокол, 11 — корпус, 12 — подвеска, 13 — рамка, 14 — корректор, 15 — бачок с маслом, 16 — блок зажимов

Колокольные дифманометры типа ДКО (рис. 109) в качестве чувствительного элемента имеют колокол *10*, частично погруженный в масло. Плюсовое (бо́льшее) давление подводится под колокол, минусовое (меньшее) — в пространство над колоколом. Под действием перепада давлений колокол начинает перемещаться вверх. Объем части колокола, погруженного в масло,

уменьшается. При этом уменьшается и архимедова выталкивающая сила, которая пропорциональна погруженному объему колокола и разности объемных весов рабочих сред, находящихся над и под колоколом. Колокол поднимается до тех пор, пока выталкивающая сила не уравновесится действием противодействующей силы

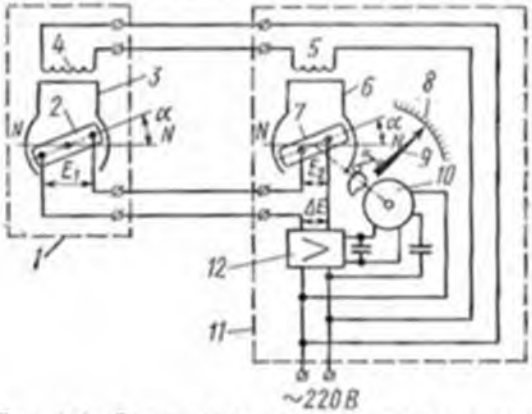


Рис. 110. Схема передачи показаний в расходомере ДКО:

1 — преобразователь, *2, 7* — роторы с обмоткой рамки, *3, 6* — магнитопроводы, *4, 5* — обмотки возбуждения, *8* — шкала, *9* — стрелка, *10* — электродвигатель, *11* — прибор, *12* — усилитель

пружины *9*. При перемещении колокола зубчатый сектор *6* разворачивает относительно оси шестерню *4*, соосно с которой находится обмотка рамки *13* ферродинамического преобразователя.

Преобразователь *1* (рис. 110) представляет собой устройство, имеющее обмотку возбуждения *4*, магнитный поток которой создается переменным током, подковообразный магнитопровод *3*, ротор *2* с обмоткой рамки.

Поворот рамки преобразователя в магнитном поле, созданном обмоткой возбуждения, приводит к наведению в рамке э. д. с., пропорциональной углу ее поворота.

Таким образом, угол поворота рамки и ее э. д. с. пропорциональны перепаду давлений, действующих на колокол приборов.

Э. д. с. рамки (ротора) преобразователя (датчика) сравнивается с э. д. с. ротора подобной чувствительной системы вторичного прибора *11* расходомера. Разность этих э. д. с. усиливается усилителем *12*, в результате чего вращается электродвигатель *10* и ротор *7* до тех пор, пока э. д. с. роторов *2* и *7* не сравняются. В этом положении оба ротора повернуты на одинаковые углы. С ротором *7* связана стрелка *9* прибора.

Перед включением расходомера в работу соединительные линии устройства отбора импульса и сам прибор подвергают испытанию на плотность и прочность.

Дифманометр заполняют рабочей жидкостью, согласно требованиям инструкции по эксплуатации. Затем соединительные линии

заполняются при измерении неагрессивных сред измеряемой жидкостью, а при агрессивных средах — разделительной жидкостью, не смешивающейся и не реагирующей с измеряемой средой и не вызывающей коррозии деталей дифманометра и материала мембран.

При заливке импульсных линий с разделительными сосудами необходимо учитывать влияние скопившегося воздуха на погрешность прибора. Поэтому прибор может быть включен в работу только через 24 ч после монтажа, заполнения соединительных линий и удаления воздушных пробок методом «простукивания» линий.

В процессе эксплуатации дифманометра необходимо производить проверку «нуля» дифманометра, закрыв «плюсовой» и «минусовой» вентили и открыв «уравнительный» вентиль дифманометра.

После проверки «нуля» вентили устанавливают в первоначальное положение.

При работе дифманометров-расходомеров необходимо учитывать, что они обеспечивают правильные показания при расходах свыше 30% от максимального значения шкалы прибора.

§ 6. Индукционные и ультразвуковые расходомеры

Индукционные расходомеры обладают незначительной инерционностью показаний, что является очень существенным фактором при автоматическом регулировании расходов. В датчиках таких расходомеров нет частей, находящихся внутри рабочего трубопровода, поэтому они имеют минимальные гидравлические потери.

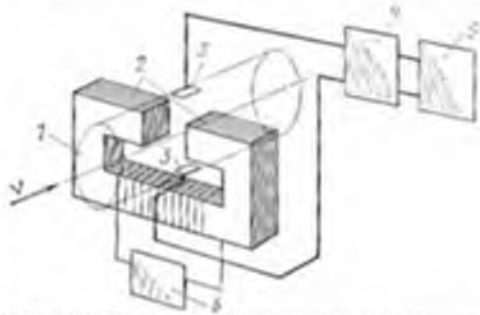


Рис. 111. Схема индукционного расходомера

Принцип действия индукционного расходомера (рис. 111) основан на законе Фарадея — законе электромагнитной индукции. Если в трубопроводе *1* течет проводящая жидкость между полюсами магнита *2*, то в направлении, перпендикулярном движению жидкости, и в направлении основного магнитного потока возникает э. д. с. на электродах *3*, пропорциональная скорости движения жидкости. Магнитное поле создается источником питания *6* электромагнита. Электронный усилитель *4* усиливает э. д. с., индуктированную на электродах *3*, которую регистрирует вторичный измерительный электронный прибор *5* расходомера.

Индуктированная э. д. с. в датчике на электродах *3* определяется уравнением электромагнитной индукции: $E = -BDKv_{ср}$, где B — магнитная индукция в зазоре полюсов магнита, D — внутренний диаметр трубопровода, K — коэффициент, зависящий от

вида магнитного поля (постоянного или переменного магнитного поля), $v_{ср}$ — средняя скорость потока жидкости.

Данные расходомеры имеют ряд недостатков — им присуще образование паразитных э. д. с. и явление поляризации электродов, при этом изменяется сопротивление датчика. Эти недостатки создают существенные дополнительные погрешности, для уменьшения которых вводят автоматическую компенсацию паразитных э. д. с., а электроды изготовляют платиновыми, танталовыми, каломелевыми и угольными.

Индукционные расходомеры позволяют измерять расходы абразивных жидкостей и пульп, щелочей, кислот и других агрессивных сред в широком диапазоне — от 1,25 до 400 $м^3/ч$.

В настоящее время выпускают индукционные расходомеры (рис. 112) типов ИР-51, 4РИМ, 5РИМ. Приборы имеют компенсацию трансформаторной э. д. с. В зависимости от типов приборов основная погрешность измерений не превышает 1,0—1,6%.

Принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на том, что фактическая скорость распространения ультразвука в движущейся среде газа или жидкости равна геометрической сумме средней скорости движения среды и собственной скорости звука в этой среде.

Чувствительным элементом датчика (излучателя и приемника) является пьезоэлемент — прямоугольная кварцевая пластинка с

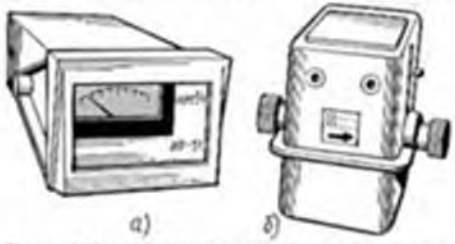


Рис. 112. Индукционный расходомер типа ИР-51:
а — измерительный блок, *б* — преобразователь

Рис. 113. Принцип действия ультразвукового расходомера

плоскопараллельными гранями, которая обладает свойствами прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта. Если к одним противоположным граням пьезоэлемента подключить напряжение, то под действием электрического поля на двух других противоположных гранях возникают механические колебания. И наоборот, если на одних гранях возбуждать механические колебания, то на противоположных гранях возникает пьезо-э. д. с. Ультразвуковой расходомер ИРУ-63 имеет датчик, электронный блок и регистрирующий прибор.

Принципиальная схема расходомера (рис. 113) включает излучатель $И_1$, создающий ультразвуковые колебания частотой от 20 кГц и выше, и приемник $П_1$, регистрирующий эти колебания, расположенный от излучателя на расстоянии L.

Если C — скорость звука в среде, а v — скорость потока жидкости, то продолжительность распространения звуковой волны по

направлению движения потока от излучателя до приемника будет равна $t_1 = L/(C+v)$. Продолжительность распространения звуковой волны против движения потока от $И_2$ до $П_2$: $t_2 = L/(C-v)$. Разность $\Delta t = t_2 - t_1$, измеренная электронным блоком, будет равна $\Delta t = 2Lv/[C^2(1-v^2/C^2)]$. Так как для жидкости $C = 1000 \div 1500$ м/с, а $v = 6 \div 8$ м/с, то величиной v^2/C^2 можно пренебречь.

Выражая скорость потока через расход ($v = Q/F$), получим уравнение измерения расхода ультразвуковых расходомеров: $Q = (FC^2 \times \times \Delta t)/(2LK)$, где F — площадь сечения потока жидкости, K — коэффициент, учитывающий распределение скоростей в потоке, Q — расход измеряемого потока.

К достоинствам приборов данного типа относят: высокое быстродействие, надежность датчиков (излучателей и приемников), принципиальная возможность измерения расходов любых жидкостей и газов, в том числе и неэлектропроводных.

§ 7. Новые методы измерения расхода жидкостей и газов

В настоящее время отечественной промышленностью успешно осваивается целый ряд перспективных методов измерения расходов, среди которых необходимо выделить массовый и основанный на ядерно-магнитном резонансе.

В массовом турборасходомере (рис. 114) ведущая турбинка *6*, вращаемая с постоянной частотой ω электродвигателем *7*, закручивает поток измеряемой жидкости, создавая в нем

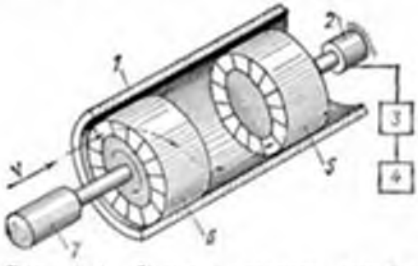


Рис. 114. Схема массового турборасходомера:

1 — корпус, *2* — чувствительный элемент (датчик), *3* — усилитель, *4* — прибор, *5* — ведомая турбинка, *6* — ведущая турбинка, *7* — электродвигатель

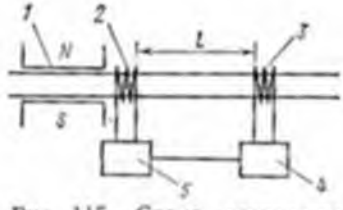


Рис. 115. Схема ядерно-магнитного расходомера

инерционный момент, пропорциональный массовому расходу Q. Измеряемый закрученный поток, проходя через ведомую турбинку *5*, жестко связанную с упругим элементом *2*, разворачивает ее на определенный угол φ, пропорциональный измеряемому расходу.

Массовый расход, определяемый по прибору, имеет вид $\varphi = K\omega Q$, где K — постоянный конструктивный коэффициент, ω — частота вращения ведущей турбинки.

Из формулы видно, что массовый расход характеризуется углом поворота ведомой турбинки, который преобразуется в пропорциональный электрический сигнал для вторичного прибора.

Погрешность измерения таких трубораскодомеров лежит в пределах 0,5—1% от верхнего предела измерения.

Расходомеры, основанные на ядерно-магнитном резонансе, используют явление взаимодействия поляризованных в постоянном магнитном поле атомных ядер с резонансным осциллирующим полем. При этом взаимодействии поглощается часть энергии осциллирующего поля и изменяется намагниченность ядер, т. е. магнитный момент ядер в единице объема вещества.

На рис. 115 показана схема ядерно-магнитного расходомера. Магнит *1* создает сильное магнитное поле, при прохождении через которое жидкость поляризуется. Протекая через катушку *2*, питающуюся переменным напряжением резонансной частоты от источника питания *5*, поляризованные ядра измеряемой жидкости поглощают часть осциллирующего поля, созданного катушкой *2*, и жидкость деполяризуется. Периодически питающее напряжение катушки *2* отключается, и в потоке на выходе из катушки создаются пакеты поляризованных молекул жидкости. Пройдя расстояние *L*, эти молекулы попадают в поле катушки *3*, питающейся тем же переменным напряжением резонансной частоты. В момент протекания поляризованных молекул через осциллирующее поле катушки *3* в ее цепи возникает сигнал ядерно-магнитного резонанса, который воспринимается электронным измерителем *4*.

Измерение расхода жидкости по данному принципу сводится к измерению времени между отключением напряжения от катушки *2* и появлением сигнала ядерно-магнитного резонанса на катушке *3*. Погрешность измерений ядерно-магнитных расходомеров не превышает 1%.

Достоинствами таких расходомеров является высокая чувствительность, малая инерционность, отсутствие конструктивных элементов прибора внутри трубопровода.

§ 8. Вторичные приборы для измерения расхода

Наиболее распространенными типами вторичных приборов для работы с электрическими индукционными дифференциально-трансформаторными датчиками расходомеров являются: автоматические показывающие и самопишущие электронные приборы типов ДСП и ДСР-1; автоматические показывающие и самопишущие миниатюрные приборы типов ДСМ2 и ДСМР2; автоматические показывающие и самопишущие электронные приборы типа КСД.

Конструкция приборов типов КСД и КПД имеет повышенную надежность и построена по блочно-модульному принципу, позволяющему значительно упростить эксплуатацию и ремонт приборов.

В зависимости от модификации и типа вторичный прибор может иметь регулирующее и сигнальное устройство, а также различные преобразователи для преобразования показаний прибора в унифицированный выходной сигнал для ввода показаний прибора в машины централизованного контроля и регулирования.

Основная погрешность вторичных приборов различных типов составляет ±0,5—1%, питание приборов производится от сети 220 В частотой 50 Гц. В приборах используется дифференциально-трансформаторная измерительная схема.

В качестве примера рассмотрим электрическую схему соединения дифференциально-трансформаторного датчика типа ДМ и вторичного прибора типа КСД (комплект расходомера) (рис. 116).

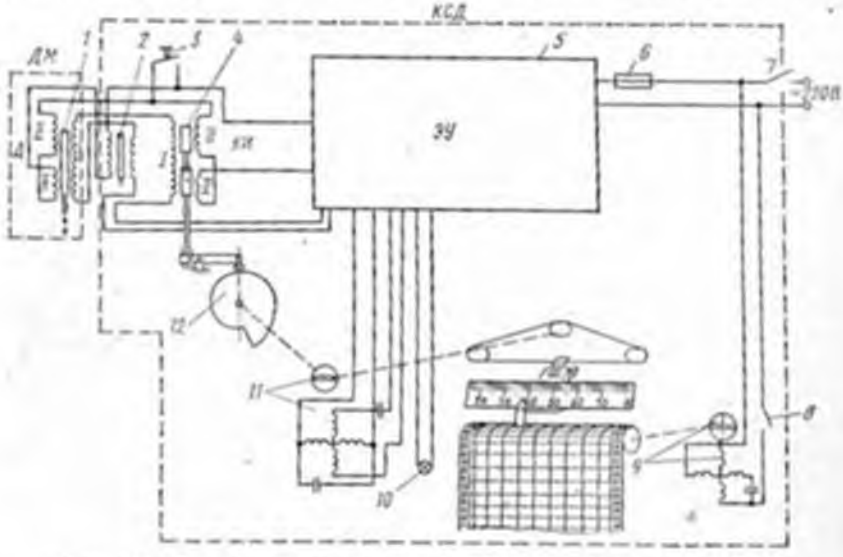


Рис. 116. Схема соединения датчика ДМ с прибором типа КСД:

1 — плунжер датчика, 2 — корректирующая катушка, 3 — кнопка контроля, 4 — плунжер катушки прибора, 5 — усилитель, 6 — предохранитель, 7, 8 — переключатель, 9 — двигатель привода диаграммы, 10 — лампа, 11 — двигатель измерительной схемы, 12 — профильный диск; I — первичная обмотка, II — вторичная обмотка, Д — катушка датчика ДМ, КИ — катушки прибора типа КСД

В приборе типа КСД установлена трансформаторная катушка *КИ*, подобная катушке *Д* датчика *ДМ*; катушки соединяются между собой по дифференциально-трансформаторной схеме.

Первичные обмотки *I* соединены последовательно и питаются от силового трансформатора электронного усилителя вторичного прибора. Вторичные обмотки *II* состоят из двух секций, которые включены встречно друг другу, а сами обмотки соединены по дифференциальной схеме, на выход которой включен электронный усилитель. В катушке *Д* плунжер *1* перемещается в зависимости от измеряемого перепада давлений, действующего на датчик при измерении расхода.

Во вторичном приборе в катушке *КИ* плунжер перемещается с помощью кулачка *12* — профильного диска, связанного с реверсивным двигателем *11* прибора. Так как первичные обмотки катушек питаются переменным током, то во вторичных обмотках катушек индуктируются переменные напряжения, величина которых зависит от положения плунжеров в катушках.

При одинаковых положениях плунжеров эти напряжения равны друг другу и на выходе дифференциальной схемы напряжение отсутствует.

При рассогласовании в положениях плунжеров напряжения, индуктируемые во вторичных обмотках, не равны друг другу и на выходе дифференциальной схемы появляется напряжение, равное их разности.

Выходное напряжение дифференциальной схемы усиливается электронным усилителем, на выход которого подключен реверсивный двигатель (электронный усилитель имеет трехкаскадный усилитель напряжения и усилитель мощности, подобные ранее разобранным схемам вторичных приборов). Реверсивный двигатель при неравенстве нулю напряжения на выходе усилителя приходит во вращение и с помощью кулачка перемещает плунжер *4* в катушке прибора *КИ* до положения, соответствующего положению плунжера *1* катушки *Д*. При соответствии положений плунжеров наступает новое равенство напряжений во вторичных катушках, разность которых равна нулю. Сигнал на входе и выходе усилителя отсутствует, двигатель и измерительная стрелка прибора находятся в состоянии покоя.

Прибор типа КСД-3 с дифференциально-трансформаторной измерительной схемой относится к приборам системы ГСП. Он может использоваться для автоматического контроля и регулирования неэлектрических величин, давления, уровня, напора, расхода и т. д. Прибор имеет стандартный выходной сигнал 0—10 или 10—0—10 МГ.

Электрическая схема прибора типа КСД-3 представлена на рис. 117. Плунжер дифференциально-трансформаторного датчика дифманометра типа ДМ перемещается чувствительным элементом, поэтому его положение определяется значением измеряемого параметра (давления, перепада давления, расхода). В приборе типа КСД-3 установлен аналогичный дифференциальный трансформатор. Плунжер *П* в его катушке перемещается с помощью лекала *Л*. Прибор для измерения давления имеет лекало в виде сектора с линейной зависимостью; прибор-расходомер имеет лекало, рассчитанное по квадратичной зависимости.

Привод лекала *Л* осуществляется реверсивным двигателем типа Д-32П1, который в зависимости от сигнала усилителя *УПДЗ*-01 может вращаться в прямом и обратном направлениях.

Обмотки катушек прибора типа КСД-3, подобно обмоткам катушек датчика-дифманометра ДМ, включены по дифференциально-трансформаторной схеме. На схеме первичный датчик-дифманометр не показан, он подключается к прибору типа КСД через разъем

Ш1: первичная обмотка к зажимам *3—4*, вторичная — к зажиму *1—2*.

Вторичная обмотка *II* прибора типа КСД-3 имеет две секции, включенные встречно. Выход дифференциально-трансформаторной

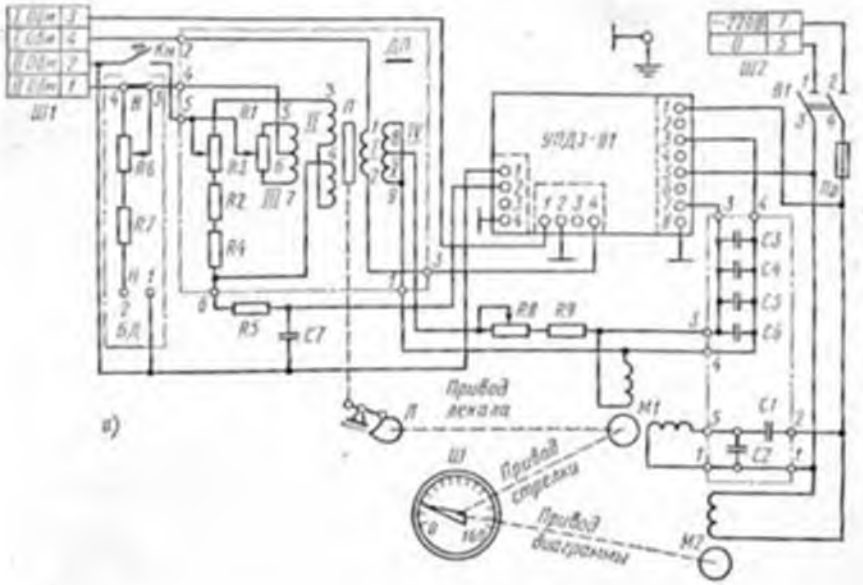


Рис. 117. Электрическая схема прибора типа КСД-3 (*а*), структурная схема прибора (*б*)

схемы подается на вход полупроводникового усилителя *УПДЗ-01*. Первичные обмотки дифференциальных трансформаторов питаются переменным током, поэтому во вторичных обмотках *II* индуктируется переменное напряжение, величина и фаза которого определяются положением плунжеров *П* в катушках.

Прибор-расходомер типа КСД-3 имеет унифицированный частотный преобразователь типа ПС или ПГ с выходным сигналом частотой 4—8 кГц. Кроме того, прибор имеет дополнительную обмотку *III*, шунтируемую переменным резистором *R1*, имеющим номинальное сопротивление 100 Ом. Эта цепь включается последовательно с вторичными обмотками датчика и самого прибора. Резистором *R1* можно изменять напряжение, подаваемое на вход прибора.

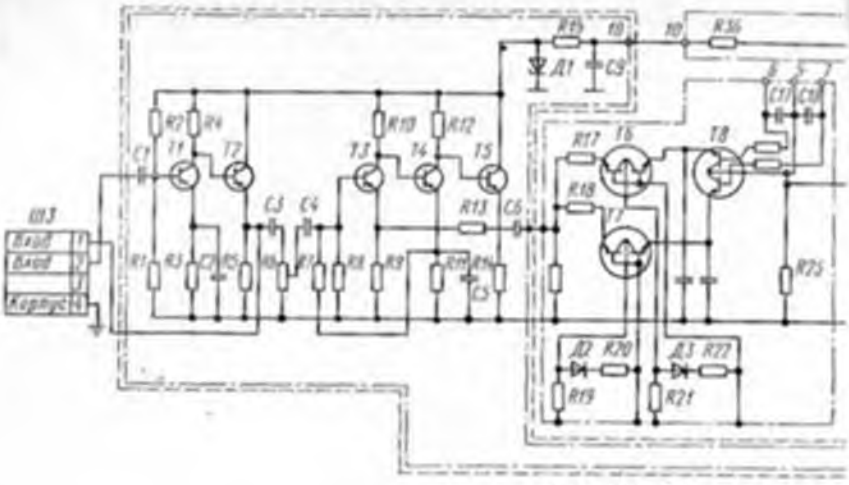


Рис. 118. Схема усилителя

Делитель *R3 — R4* шунтирует вторичную обмотку прибора и позволяет регулировать рабочий диапазон шкалы прибора.

Прибор имеет устройство *БД* (блок-делитель), позволяющий согласовать работу прибора с невзаимозаменяемыми датчиками. При положении перемычки *В* прибор работает с взаимозаменяемыми датчиками, при положении перемычки *Н* — с невзаимозаменяемыми датчиками.

К взаимозаменяемым датчикам относят дифманометры типа ДМ моделей 23573, 23574, 23582, 23583. К невзаимозаменяемым датчикам относят дифманометры типа ДМ моделей 3577, 3566, 3564, 3537. Шкалы дифманометров-расходомеров могут быть выражены в л/ч, $нм^3/ч$, т/ч, кг/ч.

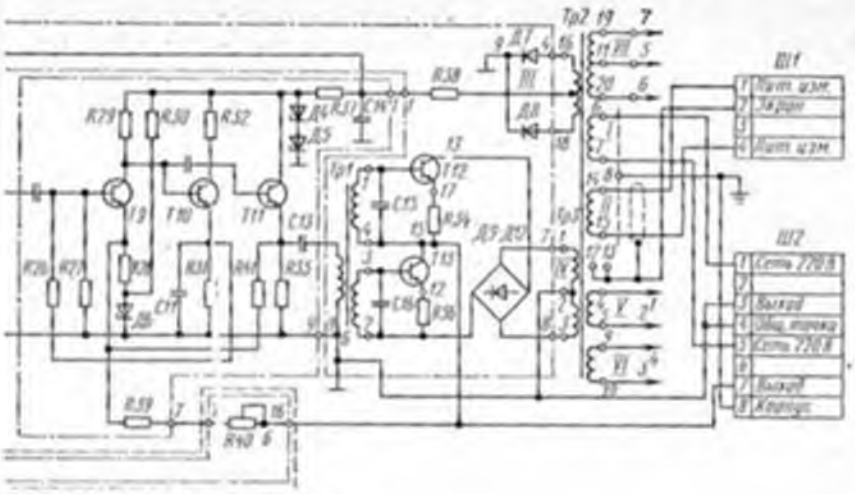
Верхнее значение шкалы прибора определяется по формуле $Q = N \cdot 10^n$, где N — ряд чисел 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,25; 4, 5; 6, 3; 8.

Полупроводниковый усилитель типа УПДЗ-01 (рис. 118), используемый в приборах дифференциально-трансформаторной схемы типа КСД-3 собран на транзисторах типов МП25Б, МП39Б, МП41А, П217В. Питание измерительной схемы осуществляется переменным током через средние точки вторичных обмоток трансформаторов *Тр2* и *Тр3*.

Усилитель имеет пять узлов: источник питания, входное устройство, демодулятор-модулятор (ДММ), усилитель напряжения и усилитель мощности.

Источник питания усилителя представляет собой два трансформатора. Нагрузкой силового трансформатора *Тр2* является выпрямитель, собранный по двухполупериодной схеме выпрямления (диоды *Д7 — Д8*). От данного выпрямителя питаются входное устройство и усилитель напряжения.

Нагрузкой трансформатора *Тр3* является выпрямитель, собран-



УПД для расходомера КСД

ный по мостовой схеме (диоды *Д9—Д12* типа Д2265), он осуществляет питание усилителя мощности. Трансформатор *Т1* является согласующим звеном для связи усилителя напряжения с усилителем мощности.

Входное устройство имеет пять транзисторов *Т1 — Т5*; транзисторы *Т1 — Т2* охвачены глубокой отрицательной обратной связью, поэтому обеспечивают большое входное сопротивление на разъеме *Ш3* (зажимы *1—2*).

Транзисторы *Т3 — Т5* представляют усилитель напряжения, охваченный глубокими отрицательными обратными связями.

Переменный резистор *R6* осуществляет регулирование коэффициента усиления усилителя за счет плавной регулировки сигнала с входного устройства.

Резисторы *R7*, *R8*, осуществляя отрицательную обратную связь по постоянному току, стабилизируют режим работы транзистора *Т3*.

Резистор *R15*, являясь отрицательной обратной связью по переменному току, позволяет увеличить входное сопротивление и стабилизировать коэффициент усиления усилителя.

Усилитель напряжения собран на трех транзисторах *Т9—Т11*. Фильтр *RC* (*R37*, *R38*, *С14*) и стабилитроны *Д4—Д5* осуществляют стабилизацию напряжения.

Резистор *R26*, являясь глубокой отрицательной связью по постоянному току, позволяет увеличить стабильность режимов транзисторов и коэффициент усиления усилителя.

Резистор *R41*, осуществляя функции подобно резистору *R26*, является глубокой отрицательной связью по переменному току.

Резисторы *R39*, *R40*, являясь отрицательной обратной связью по выходному сигналу усилителя, уменьшают выходное сопротивление усилителя.

Усилитель мощности, собранный на двух транзисторах *Т12—Т13*, выполнен по схеме последовательного баланса с включением транзисторов по схеме с общим эмиттером.

Напряжение с усилителя мощности подается на зажимы *3*, *7* разъема *Ш2*, осуществляя привод реверсивного двигателя прибора *КСД-3*.

Демодулятор-модулятор (ДММ), собранный на интегральных прерывателях *Т6 — Т8*, производит двойное электрическое преобразование: преобразование постоянного напряжения в переменное осуществляется интегральным прерывателем *П8*, а затем выпрямление переменного тока выполняют интегральные прерыватели *Т6—Т7*, собранные по двухполупериодной схеме.

Транзисторы в демодуляторе-модуляторе работают в ключевом режиме, а управление ключами выполняется переменным напряжением от силового трансформатора *Тр2*.

Если на вход ДММ поступает сигнал, сдвинутый относительно напряжения управления ключами на 90°, то выходной сигнал ДММ равен «0», т. е. на базу транзистора *Т9* усилителя напряжения сигнал не поступает.

§ 9. Сигнализаторы потока и протока

При отсутствии масла в системе смазки оборудования возникает «сухое» трение вращающихся и трущихся частей, происходит «задир» колец, поршней, оплавление баббитовых вкладышей подшип-

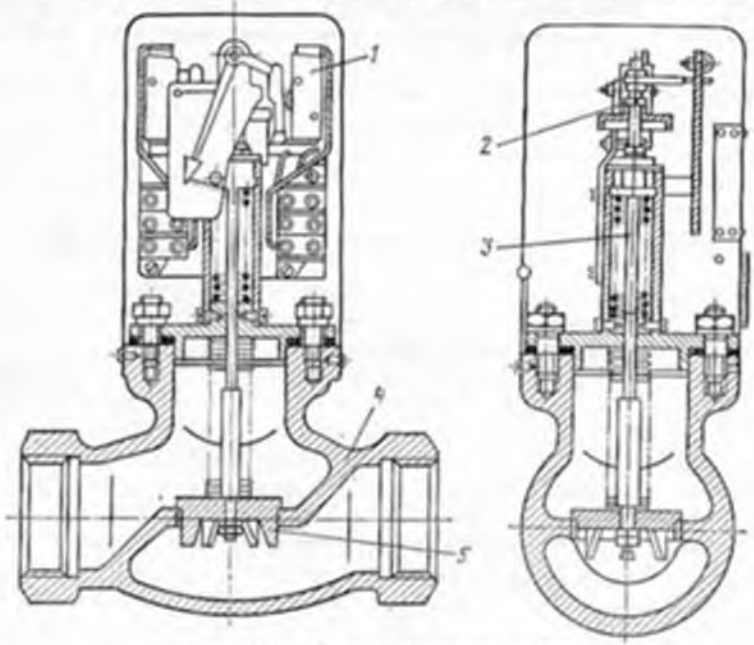


Рис. 119. Реле протока типа РП

ников. В кондиционерах, калориферах и электронагревателях при отсутствии потока воздуха нарушается тепловой режим, это приводит к перегреву и выходу из строя оборудования.

В связи с этим для защиты технологического оборудования применяют сигнализаторы потока и протока.

Реле протока типа РП (рис. 119) применяют для контроля протока жидкостей. При протекании рабочей жидкости через прибор клапан *5* под действием давления жидкости перемещается вверх, укрепленный на клапане шток *3* с помощью толкателя *2* переключает контакты микропереключателя *1*. Настройка реле протока на соответствующее срабатывание осуществляется перемещением микропереключателей *1* с кронштейном относительно корпуса *4* реле.

Реле потока РПВ-2 используют для контроля наличия потока воздуха или газа в оборудовании. Чувствительным элементом реле является подвешенная на оси заслонка, расположенная в корпусе реле. Под действием потока контролируемой среды заслонка отклоняется от первоначального положения и своим поводком переключает микропереключатель.

Реле имеет диапазон настройки по скорости потока 4—10 м/с, допустимая температура среды 55°С.

Реле контроля смазывания типа РКС (рис. 120) применяется для контроля разности давлений масла, воздуха, фреона и т. д. на входе и выходе оборудования. Чувствительными элементами прибора являются два связанных между собой сильфона, на которые через специальные штуцера подаются контролируемые давления.

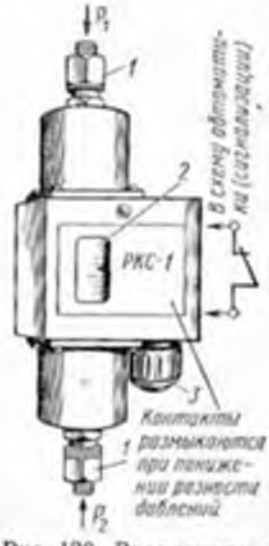


Рис. 120. Реле контроля смазывания типа РКС: *1* — штуцер, *2* — шкала, *3* — разъем

При понижении разности давлений до величины, установленной на шкале прибора, за счет пружины «диапазон настройки» происходит размыкание контактов сигнального устройства, а при повышении разности давлений до установленного предела происходит обратное переключение контактов в положение «замкнуто».

Основные выводы

1. Ротационные счетчики и приборы постоянного перепада давления (ротаметры) в силу ряда преимуществ (простоты эксплуатации и конструкции, малой стоимости) нашли широкое применение в контроле и учете малых и средних расходов газов и жидкостей.

2. Для измерения расходов методом переменного перепада давлений в трубопровод устанавливают специально рассчитанное су-

жающее устройство — диафрагму, позволяющую искусственно изменять перепад давления при изменении расхода.

3. Для использования расходомеров переменного перепада необходимо иметь диафрагму, дифференциальный датчик и регистрирующий прибор (расходомер).

4. На точность измерения расходомеров переменного перепада большое влияние оказывает неплотность соединения импульсных линий диафрагма — датчик. Утечки давления на этих линиях не допускаются.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип действия магнитной муфты поплавкового расходомера типа ДП.
2. В чем заключается принцип действия расходомеров постоянного перепада (ротаметров)?
3. Почему дифманометры-расходомеры имеют квадратичное лекало, а дифманометры-перепадомеры (уровнемеры) — линейное лекало?
4. Объясните устройство и принцип действия мембранного дифманометра типа ДМ.
5. Каковы особенности эксплуатации расходомеров переменного перепада?
6. В чем заключается принцип действия индукционных расходомеров типа ИР-51?

После усвоения материала главы и ответа на контрольные вопросы можно приступить к решению задач.

Задача № 9

Используя материал § 3 и проанализировав рис. 101, поясните, как изменится расходная характеристика ротаметра, если эбонитовый поплавок заменить стальным.

Каким образом и за счет каких сил происходит подъем поплавка прибора? Какое значение имеет масса поплавка?

Задача № 10

Проанализировав материал § 4 и рис. 102, объясните, почему комплект расходомера переменного перепада типа ДМ-КСД стал занижать свои показания при исправности датчика и регистрирующего прибора. Что можно сказать о плотности импульсной линии; что стало с перепадом давления; где можно предположить утечку измеряемого перепада?

ГЛАВА VII
ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ

§ 1. Основные понятия

Непрерывные технологические процессы в различных отраслях промышленности часто требуют постоянного автоматического контроля количества накопленного материала, сырья, жидкостей и газов. Контроль уровня часто имеет также важное значение и для безаварийной работы оборудования. Например, на водородных стан-

циях понижение уровня подпитки электролизеров может послужить причиной серьезной аварии; на тепловых электростанциях понижение и повышение заданных уровней воды в барабане котла приводит к разрушению лопаток турбин, пережогу кипятильных труб.

По принципу измерения уровнемеры делятся на следующие основные группы: поплавковые и буйковые, мембранные, дифференциальные манометры, емкостные, радиоактивные.

По своей конструкции уровнемеры могут иметь шкальные и бесшкальные датчики, работающие с самопишущими и регулирующими вторичными приборами. С помощью таких приборов осуществляется автоматический контроль и регулирование уровня жидкостей и сыпучих материалов, а также звуковая и световая сигнализации повышения или понижения уровня контролируемой среды.

Приборы измерения уровня в зависимости от категории взрывозащищенности могут быть использованы только в соответствии с их паспортными данными и инструкциями заводов-изготовителей.

Во взрывоопасных производствах должны использоваться для измерения и сигнализации уровней легковоспламеняющихся и горючих жидкостей и сред пневматические и емкостные взрывозащищенные приборы.

Согласно действующим правилам ПИВРЭ (правила изготовления взрывозащищенного электрооборудования), взрывозащищенные приборы всех типов (уровня, давления, расхода, температуры, газового анализа и т. д.) имеют индекс ВЗГ (взрывозащищенный, герметичный).

Индекс, имеющий вид дроби, отливают на крышке датчика прибора: ВЗГ/метан, ВЗГ/серный эфир, ВЗГ/водород.

Числитель дроби показывает взрывозащищенное исполнение датчика, а знаменатель — рабочую среду, в которой допускается эксплуатация прибора.

§ 2. Поплавковые и буйковые приборы

Поплавковые и буйковые приборы относят к наиболее простым приборам измерения уровня. Принцип действия поплавковых приборов основан на использовании выталкивающей силы, действующей на погруженное в жидкость тело.

Наиболее простым типом поплавковых приборов являются приборы тросового типа (рис. 121, *а*). Поплавок *4* через гибкий трос *2* связан с вращающимся шкивом *1*. Для уравновешивания всей системы на конце троса закреплен противовес *5*. С изменением уровня контролируемой жидкости происходит перемещение поплавка и троса. Для сигнализации минимального и максимального уровней на тросе устанавливают два ограничителя уровня *3*, которые при достижении заданного уровня перекидывают коромысло *7*, что приводит к переключению сигнальных электрических контактов *6*. Перемещением ограничителей уровня можно изменять диапазон сигнализации поплавкового прибора.

На рис. 121, *б* показан поплавковый прибор с одним рычагом *2*, соединяющий поплавок *1* с контрольным устройством *3*.

Приборы тросового типа нельзя применять в резервуарах, находящихся под избыточным давлением, при низких температурах и во взрыво- и пожароопасных жидкостях.

Принцип действия буйкового прибора показан на рис. 122. Стальной цилиндрический буек *8* подвешен на конце рычага *7*, который связан с торсионной трубкой *6*. Под действием буйка к упругой трубке прилагается деформирующий момент. При этом масса буйка выбирается так, чтобы он не всплывал при полном его погружении в жидкость. С повышением уровня жидкости увеличивается глубина погружения буйка и за счет увеличения выталкивающей силы уменьшается его масса, что вызывает пропорциональное

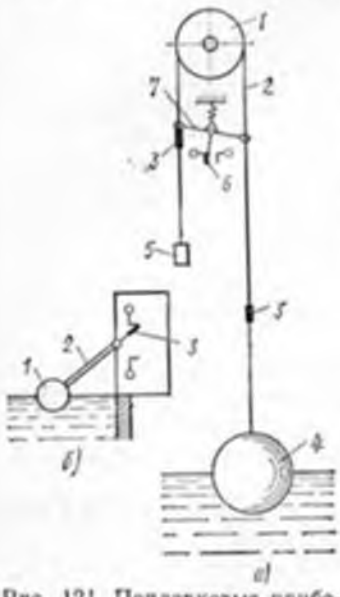


Рис. 121. Поплавковые приборы измерения уровня:
а — тросовый, б — рычажный с поплавковой камерой

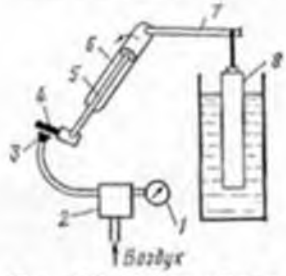


Рис. 122. Буйковый прибор измерения уровня

уменьшение угла закручивания упругой трубки *6* и стального стержня *5*, закрепленного внутри трубки. На противоположном конце стержня *5* установлена заслонка *4* пневмоустройства, которая отклоняется относительно сопла *3* на тот же угол.

Пневмоустройство *2* усиливает малое угловое перемещение заслонки в пропорциональное изменение давления сжатого воздуха, контролируемого специальным манометром *1*, шкала которого переградуирована в уровень.

Указатель уровня УДУ-5 предназначен для контроля уровня жидкостей в закрытых и открытых емкостях высотой до 12 м. Указатель имеет датчик и вторичный показывающий сигнализирующий прибор.

На рис. 123, *а* представлена схема указателя уровня УДУ-5. Металлический поплавок *9* находится на поверхности контролируемой жидкости. При изменении уровня жидкости поплавок перемещается по направляющим *7*, которые жестко закреплены на дне ра-

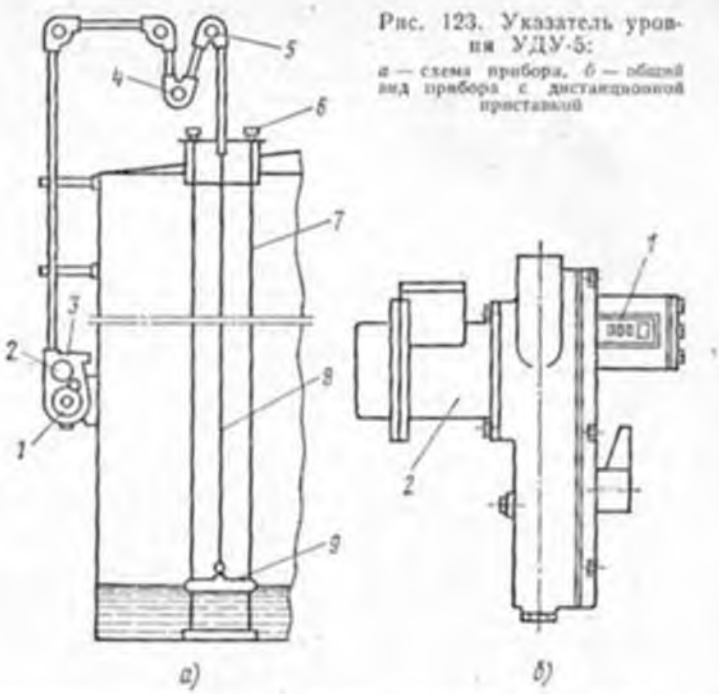


Рис. 123. Указатель уровня УДУ-5:
а — схема прибора, *б* — общий вид прибора с дистанционной приставкой

бочей емкости. Натяжным устройством *6* производится необходимый натяг направляющих. Поплавок соединен со стальной перфорированной лентой *8*, которая через направляющие ролики *4*, *5* сматывается с барабана *1* отсчетного механизма *3* или наматывается на барабан. Зубчатый шкив *2* обеспечивает надежное зацепление перфорированной ленты.

Отсчетный механизм *1* прибора УДУ-5 с дистанционной приставкой (рис. 123, *б*) представляет собой десятичный счетчик с тремя цифровыми барабанами и одним диском, цена деления которого равна 1 мм. Полная емкость счетчика равна 99 999 мм, однако из-за конструктивных особенностей прибор может использоваться для измерения уровней только до 12 000 мм.

К специальному фланцу отсчетного механизма *1* крепится потенциометрическая приставка *2* для дистанционной передачи показаний и сигнализации предельных значений уровней. Приставка представляет собой устройство, преобразующее угол поворота барабана в электрический сигнал.

При изменении положения поплавка уровнемера перемещаются щетки реохорда дистанционной приставки, которые изменяют значение сопротивления. Сопротивление, изменяемое в зависимости от уровня контролируемой жидкости, измеряется электронным мостом. Приставка имеет щетки «метров» и «сантиметров».

Комплектно с прибором УДУ-5 выпускается пульт контроля и сигнализации ПКС, который имеет две модификации: для щитового

и настольного монтажа. На лицевой панели пульта установлен электронный автоматический показывающий мост типа ЭМВ, шкала которого переградуирована в метры и сантиметры. Там же размещены сигнальные лампы предельных уровней, переключатели диапазонов «метры» и «сантиметры», тумблеры и ключи управления световой и звуковой сигнализаций.

В зависимости от модификации пульт ПКС может контролировать 10—20 резервуаров, имеющих указатели уровня типа УДУ-5.

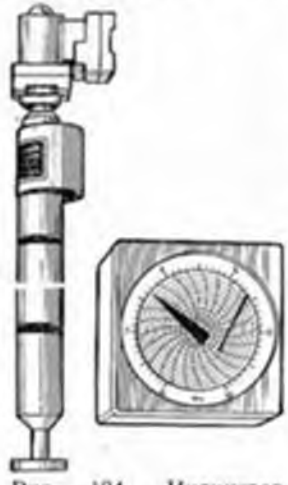


Рис. 124. Индикатор уровня типа ДИУ

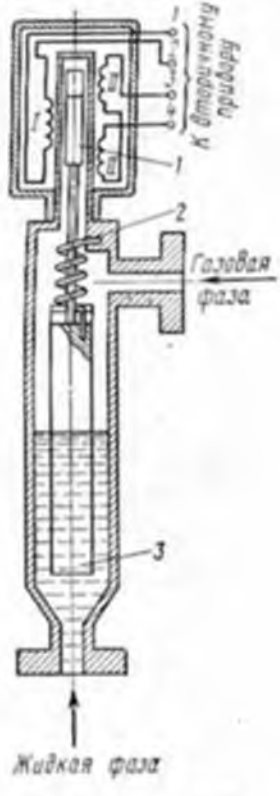


Рис. 125. Датчик уровня типа ДИУ

Дистанционный индикатор уровня типа ДИУ (рис. 124) используется для автоматического контроля и регулирования уровня жидкости в сосудах, работающих под давлением до 32 МПа (320 кгс/см²). В зависимости от модификации индикатор типа ДИУ применяется для измерения уровня в пределах 0—1600 мм. Прибор имеет взрывозащищенное исполнение и состоит из индикатора уровня буйкового типа, электрического датчика с дифференциально-трансформаторной схемой и вторичного электронного прибора.

На рис. 125 показан датчик типа ДИУ. Буек *3*, заключенный в корпус, имеет цилиндрическую форму и находится в измеряемой жидкости. При изменении уровня жидкости буек изменяет степень

погружения и несколько перемещается в вертикальном направлении. Противодействующая пружина *2* под действием разницы массы буйка и выталкивающей силы деформируется. Деформация зависит от коэффициента жесткости пружины и предела измеряемого уровня. Сердечник *1* электрического датчика жестко связан с буйком при изменении уровня жидкости перемещается относительно обмоток *I* и *II* в пределах 5—30 мм в зависимости от измеряемого уровня. Обмотка *I* питается напряжением переменного тока. При перемещении сердечника на зажимах *3—4* вторичных обмоток под действием магнитного потока первичной обмотки наводится э. д. с., величина которой измеряется электронным прибором и зависит от положения сердечника *1*.

Таким образом, между уровнем и величиной э. д. с. существует определенная зависимость, используя которую можно отградуировать шкалу вторичного прибора в уровень контролируемой жидкости.

Сигнализатор уровня типа СУ представляет собой поплавковое рычажное бескамерное реле уровня. Прибор предназначается для контроля уровня неагрессивных взрывобезопасных жидкостей в диапазоне 20—150 мм.

Устройство прибора показано на рис. 126. Поплавок *1*, находящийся на поверхности контролируемой жидкости, через тягу *2*

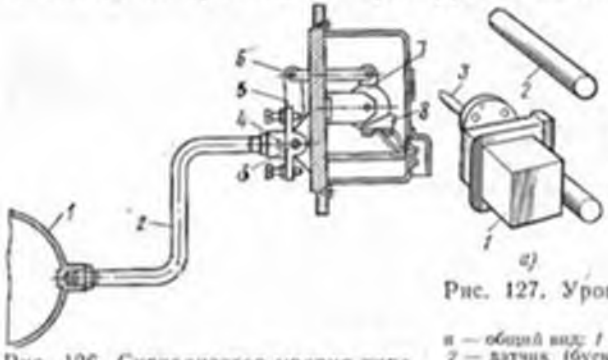


Рис. 126. Сигнализатор уровня типа СУ-4

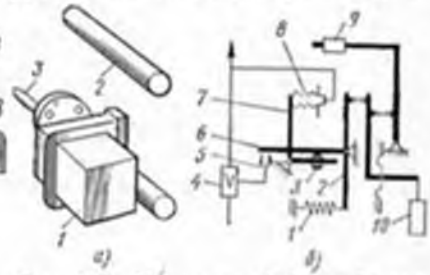


Рис. 127. Уровнемер буйковый типа УБ-П:

а — общий вид: 1 — пневмопреобразователь, 2 — датчик (буек), 3 — подвижная опора; б — схема прибора: 1 — пружина корректора нуля, 2 — Т-образный рычаг, 3 — подвижная опора, 4 — пневмореле, 5 — сопло, 6 — заслонка, 7 — Г-образный рычаг, 8 — сильфон обратной связи, 9 — груз-противовес, 10 — датчик (буек)

и направляющую *4* может свободно перемещаться относительно оси *3*. При изменении уровня жидкости поплавок изменяет свое положение и перемещает поводок *5* относительно оси. При этом тяга *6*, соединенная с поводком, поворачивает рычаг *7*, который жестко связан с поворотным валиком. На валике с помощью специальных держателей укреплены два переключателя *8*, которые в зависимости от уровня могут замыкать или размыкать свои контакты в цепи световой и звуковой сигнализаций уровней контролируемой жидкости.

Буйковые уровнемеры с пневмовыходом УБ-П и с электрическим выходом УБ-Э используют для непрерывного измерения уровня жидкостей (рис. 127, *а*).

Уровнемеры применяют в комплекте с вторичными приборами, регуляторами, работающими с выходными стандартными пневматическими сигналами 20—100 кПа (0,2—1,0 кгс/см²) или электрическим токовым сигналом 0—5 мА.

Принцип действия приборов типа УБ-П основан на пневматической силовой компенсации (рис. 127, *б*).

Изменение уровня жидкости преобразуется на чувствительном элементе (буйке) *10* измерительного блока в пропорциональное усилие, которое автоматически уравновешивается усилием сильфона обратной связи *8*. Это усилие, развиваемое давлением сжатого воздуха, является также выходным сигналом уровнемера.

Устройство буйкового уровнемера с пневмовыходом типа УБ-П аналогично описанному выше манометру с пневмовыходом типа МС-П.

При изменении измеряемого уровня происходит небольшое перемещение рычажной системы передаточного механизма и связанной с рычагом *2* заслонки *6* относительно сопла *5*. Возникшее давление в линии сопла поступает в пневмореле *4* и сильфон обратной связи *8*.

Чувствительным элементом уровнемера является стальной буек *10*. При измерении уровней жидкостей выше 1,6 м буек изготавливают составным свинчивающимся. Буек подвешивается к концу Г-образного рычага *7*. Начальная масса буйка уравновешивается специальным грузом *9*.

§ 3. Емкостные уровнемеры

В настоящее время перспективными приборами измерения уровня электропроводных и неэлектропроводных материалов являются емкостные приборы. В этих приборах в качестве чувствительного элемента используется электрическая емкость, образованная специальным рабочим электродом и металлической поверхностью стенки резервуара, между которыми находится измеряемая среда.

Электрическая емкость плоского конденсатора равна $C=\varepsilon S/(4\pi d)$, *где* ε *— диэлектрическая проницаемость среды между электродами;* S *— площадь каждого электрода;* d *— расстояние между электродами.*

При измерении уровня неэлектропроводных материалов изменяется ε, а при измерении уровня электропроводных материалов изменяется d, так как в этом случае вторым электродом служит измеряемая среда со стенкой резервуара.

Емкостные приборы измерения уровня можно разбить на две основные группы: мостовые и резонансные.

В мостовых приборах электрическая емкость, образованная датчиком-электродом и поверхностью резервуара, включается в одно из плеч моста. При изменении уровня изменяется ем-

кость датчика, это вызывает разбаланс моста и на выходе появляется напряжение, которое измеряется вторичным электронным прибором, отградуированным в единицах контролируемого уровня.

В резонансных приборах электрическая емкость включается параллельно с индуктивностью, образуя резонансный контур, который питается от высокочастотного генератора. Контур настроен на резонанс питающей частоты генератора при начальной емкости датчика, соответствующей наличию или отсутствию измеряемой среды на заданном уровне. С изменением уровня изменяется емкость датчика, что приводит к изменению частоты контура и нарушению условия резонанса, т. е. к срыву резонанса. При резонансе сопротивление контура минимальное, при срыве резонанса сопротивление контура резко увеличивается. На принципе изменения сопротивления контура при изменении контролируемого уровня строятся электронные схемы емкостных уровнемеров.

Емкостные приборы имеют высокую чувствительность, большое быстродействие, малый габарит. В качестве электродов в зависимости от измеряемой среды применяют датчики с покрытием из поливинилхлорида, фторопласта и т. д. В результате такого покрытия приборы могут использоваться в агрессивных средах, где применение контактных датчиков практически невозможно.

Электронный емкостный индикатор уровня типа ЭИУ-2 (рис. 128) используется для непрерывного дистан-

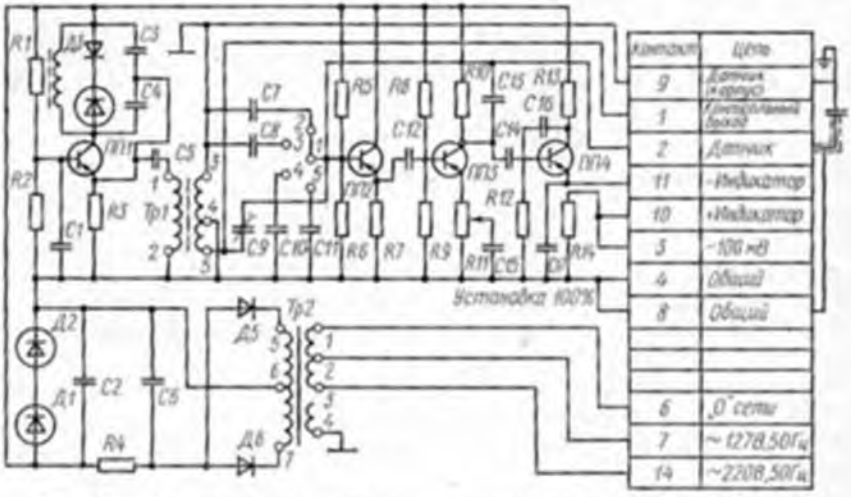


Рис. 128. Электрическая схема электронного уровнемера типа ЭИУ-2

ционного измерения уровня жидких и сыпучих электропроводных и диэлектрических сред. Индикатор имеет датчик, электронный блок и вторичный регистрирующий прибор. Пределы измерения прибора в зависимости от типа датчика составляют 1—20 м.

При изменении контролируемого уровня изменяется емкость датчика $Д$ в индуктивно-емкостном мосте, состоящего из индук-

тивностей обмоток *3—4*, *4—5*, трансформатора *Тр1* и конденсаторов *С7—С11*. Вследствие этого нарушается начальное равновесие моста и на выходе моста появляется сигнал разбаланса, пропорциональный контролируемому уровню.

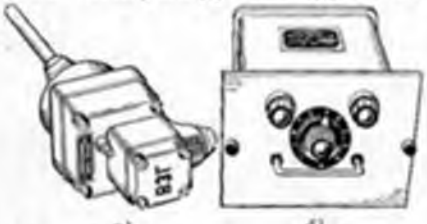
Этот сигнал поступает на базу эмиттерного повторителя *ПП2*, затем на усилительный каскад-транзистор *ПП3* и выходной каскад-транзистор *ПП4*. Показывающий прибор (миллиамперметр М-325) включен в эмиттерную цепь выходного каскада (транзистор *ПП4*). Выходное напряжение, снимаемое с резистора *R14*, в зависимости от контролируемого уровня колеблется в пределах 0—100 мВ.

Подстройка чувствительности в начале шкалы осуществляется с помощью подстроечного конденсатора *С9*, в конце шкалы — потенциометром *R11*.

Измерительный мост прибора питается от генератора синусоидальных колебаний частотой 100 кГц. В качестве генератора используется транзистор *ПП1* со схемой *LC*-контура.

Для дистанционной передачи показаний к зажимам *3—4* разъема подключают вторичный электронный регистрирующий потенциометр с входным сигналом 0—100 мВ.

Кроме индикаторов ЭИУ, позволяющих непосредственно измерять контролируемый уровень, применяют также электронные приборы, предназначенные только для автоматической сигнализации заданных уровней. К таким приборам относят электронный сигнализатор уровня ЭСУ и малогабаритный сигнализатор уровня МЭСУ (рис. 129).



а) *б)*

Рис. 129. Электронный сигнализатор МЭСУ:
а — электронный блок, *б* — силовой блок

Электронный блок прибора МЭСУ имеет взрывозащищенное исполнение ВЗГ, поэтому может использоваться для автоматического контроля и сигнализации уровней легковоспламеняющихся и горючих жидкостей до категории ЗГ (по правилам ПИВРЭ).

Силовой блок не предназначен для установки во взрывоопасных помещениях, а также работы в условиях вибрации и тряски. С помощью таких приборов можно осуществлять световую и звуковую сигнализации контролируемых уровней, а также поддерживать постоянный уровень среды автоматической подпиткой резервуара рабочей жидкостью.

Приборы состоят из силового и электронного блоков с емкостным датчиком. Силовой блок (рис. 130, *б*) состоит из трансформатора *Тр1*, предназначенного для питания электронного блока, вентиля *Д1*, собранного по однополупериодной схеме выпрямления для питания анодной цепи лампы *Л1* типа 6Н16Б. В анодную цепь лампы включено электромеханическое реле *Р1* типа МКУ-48.

Электронный блок (рис. 130, *а*) включает в себя генератор высокой частоты, собранный на лампе *Л1* типа 6Н16Б, и емкостный дат-

чик, представляющий собой электрод, покрытый изоляционным материалом — фторопластом. Если уровень ниже заданного предела, то емкость датчика меньше критической и прибор генерирует высокочастотные колебания. При этом ток в анодной цепи лампы и реле

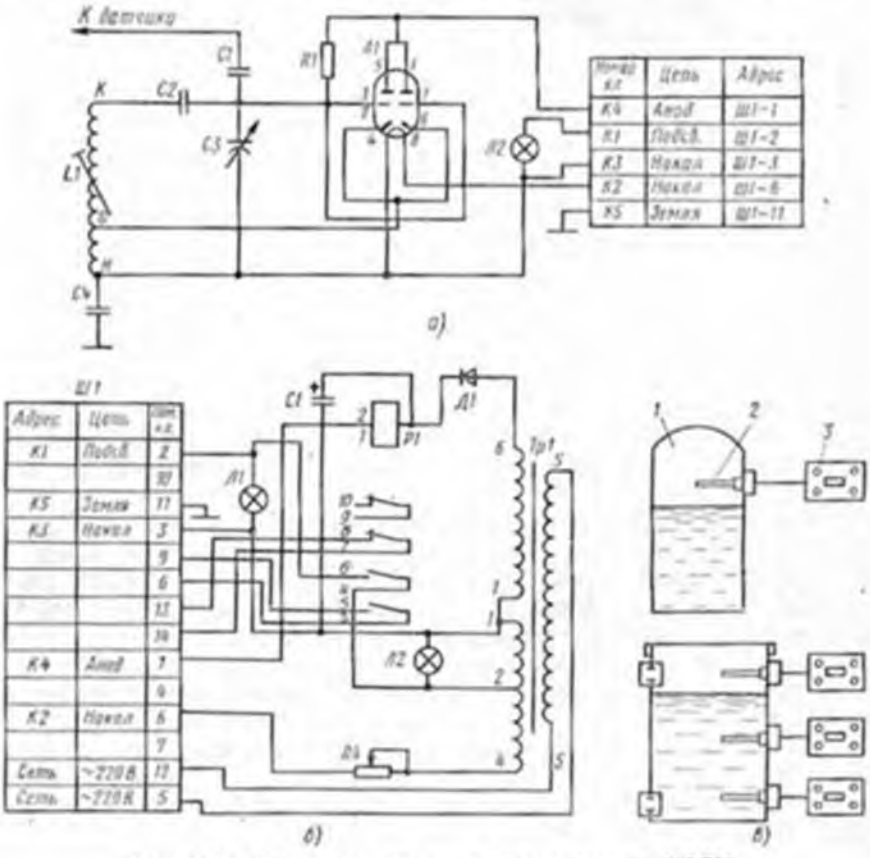


Рис. 130. Схема электронного сигнализатора МЭСУ:
а — электронный блок, *б* — силовой блок, *в* — схема установки датчиков; *1* — емкость, *2* — датчик, *3* — электронный блок

минимальный. При достижении средой заданного контролируемого уровня резко изменяется емкость датчика, происходит срыв высокочастотных колебаний генератора, резко возрастает анодный ток и ток в катушке реле *Р1*, которое переключает свои контакты в цепи сигнализации.

Прибор настраивают на рабочем резервуаре, при этом оценкой правильной работы прибора является зажигание сигнальной лампы при прикосновении датчика с контролируемой средой. Емкость *С3* является подстроечной емкостью контура.

§ 4. Дифференциальные и пьезометрические приборы

Дифференциальные приборы. Дифференциальные манометры как датчики применяются для измерения и контроля уровня в комплекте со вторичными приборами — уровнемерами.

Рабочий диапазон измерения таких приборов составляет: поплавкового дифманометра типа ДП-63 — 1000 см, мембранного дифманометра типа ДМ-25 — 6300 см, сильфонного дифманометра типа ДС-25—6300 см.

Для измерения уровня жидкостей в закрытых резервуарах дифманометр подключают следующим образом: плюсовую импульсную трубку датчика подключают через запорный вентиль к нижней точке резервуара; минусовую импульсную трубку датчика подключают к уравнительному сосуду, соединенному с верхней точкой резервуара. При таком подключении дифманометр измеряет разность гидростатических давлений в измеряемом резервуаре и уравнительном сосуде.

При такой схеме подключения датчика необходимо учитывать постоянную погрешность измерений, связанную с перепадом давления, возникающего от разности температур жидкости в измеряемой емкости (танке, резервуаре, газгольдере) и температурой окружающей среды.

В измерениях уровней для уменьшения погрешности используют двухкамерные уравнительные сосуды.

Электрическая схема соединения датчика-дифманометра и вторичного прибора-уровнемера с дифференциально-трансформаторной схемой аналогична приведенной схеме (см. рис. 116). Отличительным элементом вторичного прибора-уровнемера с дифференциально-трансформаторной схемой является секторное линейное лекало, приборе-расходомере — квадратичное лекало.

Пьезометрические приборы. Для измерения уровней жидкостей применяют также приборы, принцип действия которых основан на свойстве контролируемого материала оказывать гидростатическое давление на дно или стенки рабочей емкости.

Закон гидростатического давления в общем виде можно записать так: $P=\gamma H$, где P — давление жидкости, γ — плотность жидкости, H — высота столба жидкости.

Наиболее распространенными приборами этой группы являются манометрические, дифференциально-манометрические и пневматические приборы.

На рис. 131, *а* показана схема измерения уровня жидкости с помощью манометра, шкала которого отградуирована в единицах измерения уровня. Такие схемы отличаются простотой, однако чтобы не вносить дополнительной погрешности при измерениях, прибор необходимо устанавливать в нижней части емкости (отметка *а — а*).

Мембранные уровнемеры работают по схеме, приведенной на рис. 131, *б*. Чувствительным элементом, воспринимающим давле-

ние жидкости, является мембрана *1*, которая передает давление на измерительный прибор *3* через импульсную трубку *2*, заполненную жидкостью или газом.

В случаях измерения уровней агрессивных, кристаллизирующихся жидкостей, пульп широко применяют пьезометрические датчики уровня типа ДДП, принцип действия которых показан на

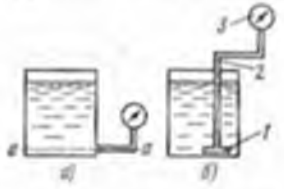


Рис. 131. Манометрические способы измерения уровня:
а — с отбором контролируемой среды, *б* — мембранный

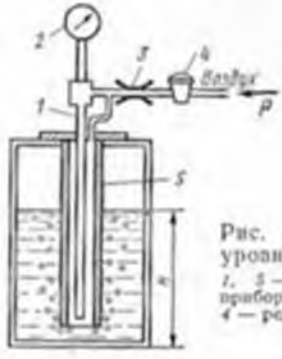


Рис. 132. Датчик уровня типа ДДП:
1, *5* — трубки, *2* — прибор, *3* — дроссель, *4* — редуктор, *H* — уровень

рис. 132. Если трубку *1* поместить внутрь трубки *5* и подавать через трубку *1* определенное количество воздуха, то он вытеснит жидкость из трубки *5*. Во внутренней полости трубки установится давление *P*, определяемое глубиной погружения трубки и плотностью жидкости. Шкала прибора *2*, измеряющего это давление, пересчитана в единицы измерения уровня.

Для дистанционной передачи показаний применяют как пневматические датчики уровня, так и дифференциальные манометры. При этом давление воздуха в пневмотрубке преобразуется в стандартный выходной пневматический или электрический сигнал, величина которого пропорциональна величине контролируемого уровня жидкости.

Вторичные измерительные приборы в зависимости от потребности могут быть показывающими, самопишущими и сигнализирующими.

При дистанционном измерении уровня погрешность прибора определяется суммарной погрешностью преобразователя и вторичного прибора, величина которой составляет 2,5—3,5%. Допустимый диапазон измерения уровня составляет от 0 до 40 кПа (4000 мм вод. ст.).

§ 5. Радиоизотопные приборы

Практическое применение для измерения уровня получил радиоизотопный метод, основанный на поглощении или ослаблении средой потока гамма-лучей, просвечивающих контролируемую среду.

На этом принципе работают все радиоизотопные приборы контроля уровня, которые незаменимы в тех случаях, когда контроль должен осуществляться без проникновения в контролируемую сре-

ду. Такие приборы отличаются высокой надежностью и экономичностью.

Радиоизотопные приборы контроля уровня состоят из двух основных частей: источника излучения и приемника излучения. Источник излучения имеет коллиматор, позволяющий формировать направленный пучок излучения радиоактивного вещества. Приемник излучения преобразует действие гамма-лучей в электрические сигналы для автоматического контроля или регулирования контролируемого уровня. Он представляет собой датчик-счетчик излучения и электронный блок, усиливающий сигнал излучения.

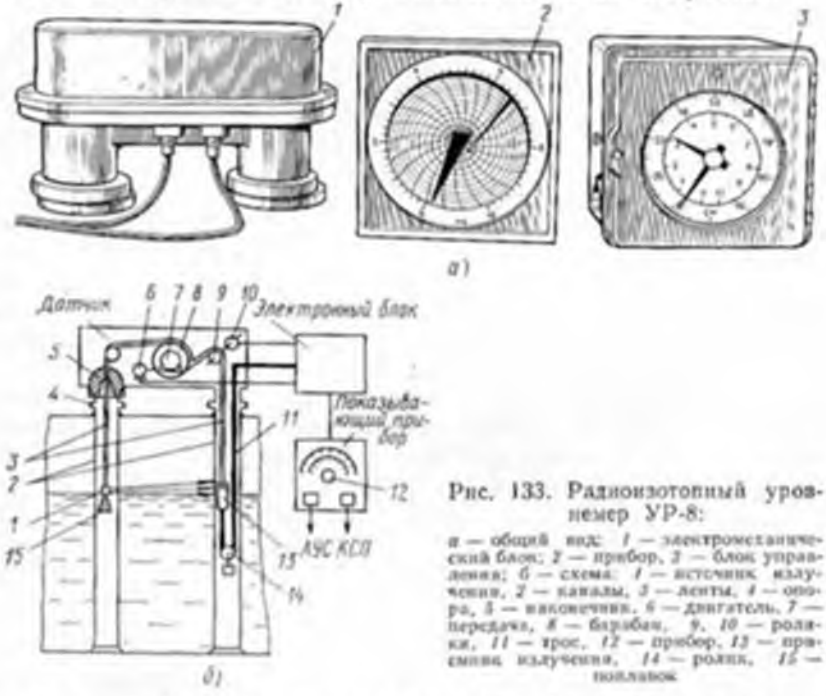


Рис. 133. Радиоизотопный уровнемер УР-8:

а — общий вид: 1 — электромеханический блок; 2 — прибор, 3 — блок управления; б — схема: 1 — источник излучения, 2 — каналы, 3 — ленты, 4 — опора, 5 — наконечник, 6 — двигатель, 7 — передача, 8 — барабан, 9, 10 — ролики, 11 — трос, 12 — прибор, 13 — приемник излучения, 14 — ролик, 15 — поплавок

В качестве радиоактивного вещества (источника излучения) применяется цезий-137 с активностью не более 0,5 мг-экв радия и периодом полураспада 33 года.

Любое радиоактивное вещество характеризуется определенной активностью.

Единицей активности радиоактивного вещества является кюри.

К ю р и есть такое количество радиоактивного вещества, в котором за 1 с происходит $3{,}7 \cdot 10^{10}$ актов распада. Однако в технике активность чаще измеряют в радиевых эквивалентах.

Миллиграмм-эквивалент радия (мг-экв радия) — это гамма-эквивалент радиоактивного вещества, гамма-излучение которого при данной фильтрации создает такую же мощность дозы, что и гамма-излучение одного миллиграмма радия Государственного эталона радия СССР при платиновом фильтре толщиной 0,5 мм.

Радиоизотопный следящий уровнемер УР-8 (рис. 133, *а*) позволяет осуществлять непрерывный дистанционный контроль уровня сыпучих материалов и жидкостей при рабочих давлениях до 25 МПа (250 кгс/см²). Диапазон измерения уровня 200, 400, 600, 700 и 1000 см.

Прибор представляет собой автоматическую следящую систему (рис. 133, *б*). Электрический реверсивный двигатель *6* через червячную передачу *7* вращает барабан *8*, на который наматываются две металлические ленты *3*. На концах лент помещены источник излучения *1* и приемник излучения *13*, находящиеся в одной горизонтальной плоскости. Если изменяется уровень контролируемой среды, то изменяется положение источника излучения *1*; при этом пучок γ-лучей в зависимости от уровня проходит выше или ниже уровня приемника. Приемник регистрирует изменение интенсивности излучения и выдает электрический сигнал на вращение двигателя *6*, который вновь восстановит систему источник излучения — приемник излучения на один горизонтальный уровень. Уровнемер имеет вторичный показывающий прибор *12* электрической или пневматической системы, шкала которого отградуирована в единицах измерения уровня.

Радиоизотопный автоматический уровнемер типа УДАР-5 позволяет измерять, сигнализировать и регулировать контролируемый уровень щелочных, кислотных, взрывоопасных жидкостей и сыпучих материалов.

Прибор имеет датчик, электронно-механический блок и пульт управления. Источником радиоактивного излучения является изотоп — цезий-137. Прибор позволяет измерять уровень до 15 м с высокой точностью (±2 мм). Мощность прибора не превышает 80 Вт при напряжении сети 220 В, частоты 50 Гц.

Принцип действия и устройство прибора подобны принципу действия и устройству прибора типа УР-8.

Основные выводы

1. Благодаря простоте и надежности поплавковые, буйковые и пьезометрические уровнемеры нашли широкое использование в местном контроле и сигнализации уровней жидких сред.

2. Электронные емкостные и радиоизотопные уровнемеры используются при контроле агрессивных и взрывоопасных сред, сигнализации аварийных значений уровней и отключении технологического оборудования.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие обозначения имеют приборы взрывозащищенного исполнения?
2. Поясните принцип действия указателя уровня типа УДУ-5; каково назначение поплавка?
3. Будет ли правильно работать уровнемер типа УБ-П при неуровновешенной системе буек — противовес?
4. Поясните устройство радиоизотопного уровнемера УР-8.

После усвоения материала главы и ответа на контрольные вопросы можно приступить к решению задач.

Задача № 11

Буйковый уровнемер с пневмовыходом типа УБ-П имеет показания, отличные от действительного уровня контролируемой жидкости. Анализируя схему (рис. 127, *б*), предложите вариант корректировки показаний прибора.

Задача № 12

Фактический уровень контролируемой жидкости постепенно уменьшается, однако прибор типа ЭИУ или МЭСУ не фиксирует данного состояния объекта измерения.

Определить, что неисправно в приборе: емкостный датчик или электронный блок.

ГЛАВА VIII
АВТОМАТИЧЕСКИЕ АНАЛИЗАТОРЫ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ

§ 1. Основные понятия

В настоящее время ряд производственных технологических процессов в химической, газовой, металлургической, машиностроительной и электронной промышленности контролируются с помощью автоматических газоанализаторов. Технологические газоанализаторы позволяют автоматизировать процессы и улучшать качество продукции.

Существуют газоанализаторы, контролирующие загазованность производственных помещений на предмет соблюдения правил техники безопасности. Например, при производстве водорода в химической и электронной промышленности газоанализаторы контролируют как качество вырабатываемого водорода, так и загазованность им производственных помещений. При недопустимой концентрации водорода в производственном помещении включается световая и звуковая сигнализации, а в некоторых случаях автоматически отключается работающее оборудование.

В отдельных отраслях машиностроения при использовании печей отжига на природном газе (или водороде) автоматические сигнализаторы позволяют определять загазованность производственных помещений и предотвращать возможность образования взрывоопасных концентраций смесей воздух — водород, воздух — природный газ.

В электронной промышленности при выпуске полупроводниковых приборов, генераторных ламп и больших интегральных схем качество энергоносителей — азота, аргона и водорода — контролируется с помощью целого ряда сложнейших современных автоматических газоанализаторов. Таким образом, автоматические газоанализаторы можно подразделить на две группы: анализаторы для контроля и управления производственными процессами; анализаторы безопасности производства.

Для получения показаний прибора, зависящих только от концентрации определяемого компонента газа, в газоанализаторах предусматривают стабилизацию отдельных параметров или компенсацию их влияния.

Основные параметры, подлежащие стабилизации в газоанализаторах: величина расхода анализируемого газа, пропускаемого через датчик; напряжение питания измерительной схемы; температура анализируемого газа и окружающей среды.

Расход газа, пропускаемого через датчик, стабилизируется, как правило, регулятором расхода. В некоторых случаях вместо регулятора устанавливают ротаметр, позволяющий поддерживать требуемый паспортный расход через датчик.

Напряжение питания во многих газоанализаторах стабилизируется феррорезонансным стабилизатором типа С-0,09.

Температура газа стабилизируется узлами термостатирования в приборах, требующих стабилизации по принципу действия прибора.

§ 2. Единицы измерения концентрации

При практических измерениях концентрация веществ выражается в весовых и объемных единицах.

Весовая концентрация выражается весовым количеством вещества в единице объема: числом граммов вещества в 1 $нм^3$ (г/$нм^3$); числом граммов вещества в 1 л (г/л); числом граммов вещества в 100 г смеси (% весовые); числом миллиграммов вещества в 1 $нм^3$ (мг/$нм^3$); числом миллиграммов вещества в 1 л (мг/л).

Однако при измерении малых весовых концентраций (микроконцентраций) такие единицы становятся неприемлемыми. При этом весовую концентрацию удобно выражать в гаммах. 1 гамма = $=10^{-3}$ мг $=10^{-6}$ г; 1 мг/$нм^3$ = 1 гамма/л.

Объемная концентрация выражается числом миллилитров вещества в 1 л (10^{-1}%); числом миллилитров вещества в 1 $м^3$ (10^{-4}%). При измерении объемной микроконцентрации используются также единицы: ppm (миллионная доля) и ppb (миллиардная доля); ppm соответствует такой объемной концентрации, когда в миллионе молекул вещества находится одна молекула определенного компонента 1 ppm $=10^{-6}$% $=10^{-4}$% объемных; ppb соответствует такой объемной концентрации, когда в миллиарде молекул вещества находится одна молекула определяемого компонента 1 ppb = $=10^{-9}$% $=10^{-7}$% объемных.

§ 3. Термомагнитные газоанализаторы

Термомагнитные газоанализаторы получили широкое применение для определения содержания кислорода в газах и газовых смесях.

Магнитные свойства кислорода, т. е. его магнитная восприимчивость, резко отличаются от всех остальных газов (табл. 12). Поэтому принцип действия таких газоанализаторов основан на использовании явления, обусловленного ярко выраженными магнитными свойствами кислорода по сравнению со слабыми магнитными свойствами остальных компонентов газовой смеси. Датчик прибора со-

держит нагретый током проводник, находящийся в неоднородном магнитном поле постоянного магнита, обтекаемый контролируемой газовой смесью. Если в газовой смеси присутствует кислород, то его молекулы, будучи парамагнитными, ускоряют свое движение, взаимодействуя с полем магнита. Однако за время соприкосновения с нагретым проводником молекулы кислорода теряют свои магнитные свойства и свободно выталкиваются из магнитного поля датчика новым «холодным» потоком газа. Новая порция кислородсодержащего газа снова нагревается, теряет магнитные свойства и поступает

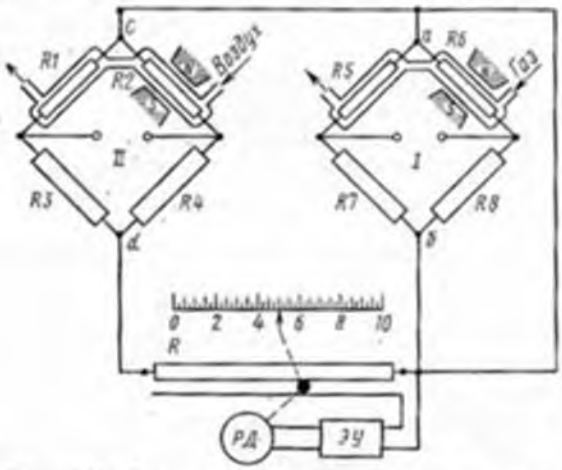


Рис. 134. Измерительная схема газоанализатора типа МН:

I — рабочий мост, II — сравнительный мост, РД — реверсивный двигатель, ЭУ — усилитель, R — реохорд, R1, R2 — плечевые элементы, R3, R4, R7, R8 — постоянные плечи моста, R5, R6 — датчики (чувствительные элементы)

на выход газовой схемы датчика. Таким образом возникают конвекционные потоки — термомагнитная конвекция.

Чем больше содержание кислорода в газовой смеси, тем больше термомагнитная конвекция. За счет отдачи тепла от чувствительного элемента меняется его температура и электрическое сопротивление. Следовательно, по величине сопротивления чувствительного элемента можно определять концентрацию кислорода в измеряемой газовой смеси.

Наиболее распространенным типом термомагнитного газоанализатора для непрерывного определения содержания кислорода в газовых смесях является автоматический самопишущий и показывающий газоанализатор типа МН (рис. 134). Прибор имеет десять модификаций с пределами измерений от 0 до 100% кислорода. Основная погрешность измерений не превышает ±0,5—2,5)%. Температура анализируемой газовой смеси должна находиться в пределах 5—50°С, расход газа через газовую схему прибора составляет 0,7 л/мин.

. В состав газоанализатора входят: приемник, стабилизатор напряжения и вторичный электронный самопишущий прибор.

Приемник преобразует изменение концентрации кислорода в анализируемой газовой смеси в напряжение переменного тока. Основными элементами приемника являются два моста — рабочий *I* и сравнительный *II*.

Рабочий мост используется для определения содержания кислорода в газах, сравнительный — для проверки чувствительности прибора по воздуху (в воздухе содержание кислорода составляет

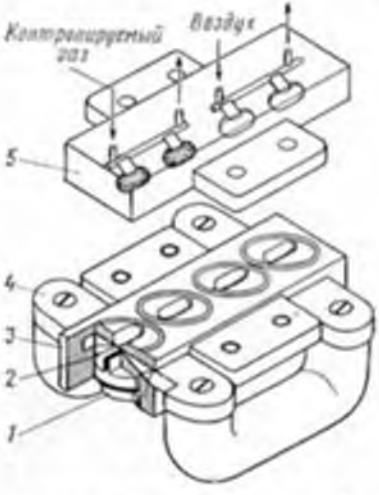
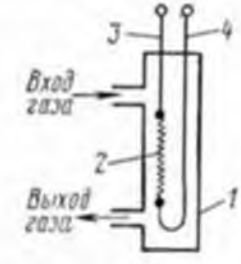


Рис. 135. Камера-датчик газоанализатора типа МН

Рис. 136. Чувствительный элемент:
1 — стеклянный корпус, *2* — нить, *3*, *4* — выводы



~21%). В рабочем мосте *I* чувствительные элементы *R5* и *R6* находятся в специальных проточных ячейках, через которые с постоянной скоростью проходит анализируемая газовая смесь. Сопротивления *R7* и *R8*, являясь манганиновыми постоянными сопротивлениями, образуют два других плеча рабочего моста.

Конструктивно сравнительный мост *II* выполнен подобно рабочему мосту *I* и имеет два чувствительных элемента *R1* и *R2* и два постоянных сопротивления *R3* и *R4*. Сопротивления чувствительных элементов *R1* и *R2* находятся в ячейках сравнительной камеры, которая может сообщаться с воздухом.

Приемная камера-датчик с магнитной системой показана на рис. 135. В корпусе камеры имеются четыре ячейки для установки чувствительных элементов *2*. В двух ячейках находятся чувствительные элементы рабочего моста, которые обтекаются анализируемой газовой смесью; в двух других — установлены чувствительные элементы сравнительного моста, которые обтекаются воздухом. Чувствительные элементы закрепляют на специальных держателях *1* с токосъемниками.

Чувствительные элементы расположены в магнитном поле в нижней части камеры между полюсами магнита и представляют собой стеклянный проточный капилляр, внутри которого вплавлена

платиновая проволока, нагреваемая до температуры 200—250°С источником тока (рис. 136).

Таким образом, платиновая спираль *R6* (см. рис. 134) является и нагревательным элементом, способствующим возникновению термомагнитной конвекции, и одновременно чувствительным элементом, включенным в измерительную схему датчика.

Корпус *4* камеры-датчика — латунный, наконечники *3* изготовлены из сплава марки «Армко». Сверху камера-датчик закрыва-

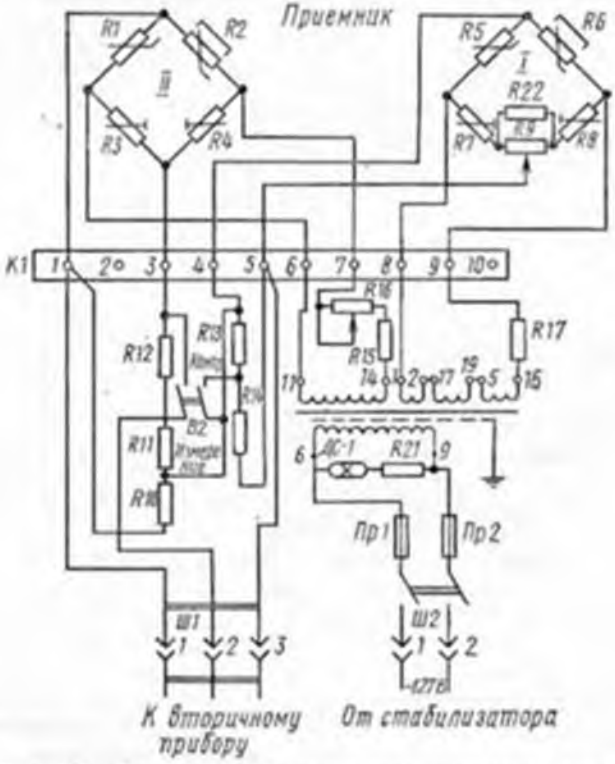


Рис. 137. Электрическая схема газоанализатора типа МН-5130

ется латунной крышкой *5*, уплотняется резиновыми прокладками и закрепляется с помощью четырех винтов (см. рис. 135).

Плечевые элементы рабочего и сравнительного мостов *R6* и *R2* находятся в неоднородном магнитном поле постоянного магнита.

Если кислород в анализируемой смеси отсутствует, то рабочий мост *I* сбалансирован (*R5*=*R6*=*R7*=*R8*), поэтому ток в измерительной диагонали *аб* (см. рис. 134) отсутствует и прибор имеет нулевые показания. При появлении кислорода в газовой смеси изменяется сопротивление плечевых элементов *R5* и *R6*, нарушается

условие равновесия рабочего моста и в измерительной диагонали появляется напряжение, пропорциональное концентрации кислорода. Это напряжение усиливается электронным усилителем *ЭУ*, реверсивный двигатель *РД* приходит во вращение и вращается до момента установления равновесия в измерительной схеме. Стрелка прибора укажет при этом концентрацию кислорода.

Электрическая схема газоанализатора МН-5130 приведена на рис. 137. Рабочий *I* и сравнительный *II* мосты питаются от трансформатора напряжением 24 В; рабочий — через зажимы *8—9*, сравнительный — через зажимы *6—7*. Измерительные диагонали мостов в зависимости от положения переключателя *В2* «контроль — измерение» подключаются на вход электронного измерительного прибора, шкала которого градуируется в процентах объемной концентрации кислорода.

Наиболее распространенными модификациями газоанализаторов типа МН являются: газоанализатор МН-5106 с пределом измерений 0—10% кислорода применяется при измерении кислорода в отходящих топочных газах; газоанализаторы МН-5121, МН-5122 с пределом измерения 19—25% кислорода применяют для определения кислорода в воздухе помещений; газоанализатор МН-5130 в зависимости от модификаций используется для измерения кислорода в пределах 0—100% и применяется для определения кислорода в многокомпонентных газовых смесях.

В качестве вторичного прибора в газоанализаторах типа МН используют электронные самопишущие мосты типа КСМ.

Для измерения следов кислорода в инертных газах используют газоанализаторы типов ГЛ-5108, ГЛ-5115, «Циркон», позволяющие измерять кислород в пределах микроконцентраций от 10^{-3} до 10^{-8} объемного процента (об%).

§ 4. Термокондуктометрические газоанализаторы

Принцип действия данных приборов основан на измерении теплопроводности определяемого газа в газовой смеси.

Теплопроводность — это физическая величина, характеризующая количество теплоты, которое проходит за 1 с через площадь в 1 см² при падении температуры в 1 °С на расстоянии 1 см.

Термокондуктометрические газоанализаторы широко используют для определения содержания водорода и двуокиси углерода (углекислого газа) в других газах.

В табл. 13 приведены теплопроводности некоторых газов.

Определение содержания какого-либо газа в газовой смеси по теплопроводности производится косвенно, по изменению электрического сопротивления чувствительного элемента, через который проходит измеряемая газовая смесь. Чувствительным элементом газоанализатора является платиновая нить, нагреваемая электрическим током. При изменении теплопроводности газовой смеси меняется теплоотдача от платиновой нити, вследствие чего изменяется ее температура и электрическое сопротивление. Поэтому величина

электрического сопротивления чувствительного элемента является мерой концентрации определяемого газа в газовой смеси. Наиболее распространенными приборами термокондуктометрического типа являются промышленные автоматические газоанализаторы типа ТП, позволяющие непрерывно определять объемную концентрацию какого-либо компонента: водорода в газовых смесях, гелия в воздухе, кислорода в гелии, кислорода в водороде, метана в воздухе, азота в гелии или углекислого газа в газовых смесях.

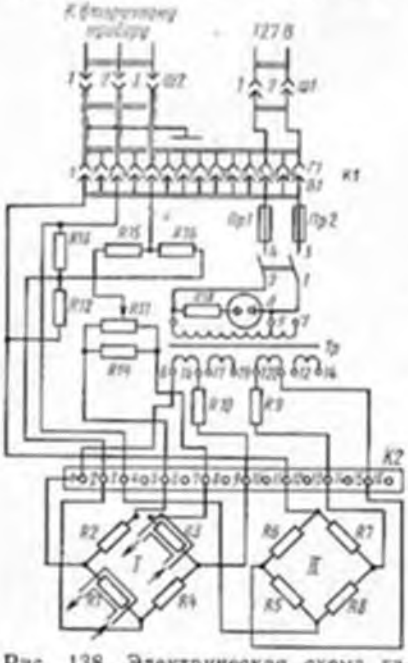


Рис. 138. Электрическая схема газоанализатора типа ТП-5005

Газоанализаторы типа ТП работают в диапазоне температур от 5 до 50 °С. Расход газа через измерительную газовую схему прибора составляет 12 см³/с. В зависимости от предела измерения погрешность газоанализаторов составляет 4—10%.

Вторичные приборы — электронные мосты типа КСМ — имеют шкалу, выраженную в объемных процентах измеряемого компонента, снабжены сигнальным контактным устройством, посредством которого можно сигнализировать изменение процентного содержания измеряемого газа.

Электрическая схема газоанализатора ТП-5005 показана на рис. 138. Измерительная схема газоанализатора имеет два моста: рабочий *I* и сравнительный *II*.

Рабочий мост *I* образован четырьмя сопротивлениями: два сопротивления *R2* и *R4* запаяны в стеклянные закрытые ампулы с газовой смесью, соответствующей началу шкалы, два других — *R1* и *R3* — находятся в открытых стеклянных ампулах, через которые проходит измеряемая газовая смесь. Сравнительный мост *II* образован также четырьмя элементами: два сопротивления *R5* и *R7* запаяны в закрытые стеклянные ампулы, заполненные газовой смесью, соответствующей началу шкалы, и два сопротивления *R6* и *R8* запаяны в закрытые стеклянные ампулы с газовой смесью, соответствующей концу шкалы прибора.

Через разъем *Ш1* газоанализатор питается переменным напряжением 127 В (зажимы разъема *12—14*). Неоновая лампа *Л* является индикатором включения напряжения питания.

Нагрузкой силового трансформатора *Тр* служат рабочий и сравнительный мосты измерительной схемы, которые питаются от раздельных вторичных обмоток трансформатора (зажимы колодки *К-2 1—9* и *13—15*). Сопротивления *R9* и *R10* предназначены для

регулирования тока питания мостов только при заводской градуировке газоанализатора. Сопротивление *R11* используется для подстройки нуля прибора в процессе эксплуатации газоанализатора на объектах.

Если теплопроводность измеряемой газовой смеси, проходящей через элементы *R1* и *R3*, равна теплопроводности газа, находящегося в закрытых стеклянных ампулах с сопротивлениями *R2* и *R4*, то сопротивления плечей моста равны друг другу ($R1=R2=R3=R4$) и мост при этом находится в равновесии, а в измерительной цепи *1—2—3* (разъем *Ш2*) ток отсутствует.

Если изменяется состав газовой смеси, проходящей через элементы рабочего моста, то происходит изменение температуры чувствительных элементов *R1* и *R3*, изменится их электрическое сопротивление по отношению к сопротивлениям *R2* и *R4*. Так как равенство сопротивлений плечей моста *R1—R4* нарушается, то нарушается и равновесие моста, а в измерительной цепи *1—2—3* (разъем *Ш2*) протекает ток, пропорциональный концентрации определяемого компонента.

Газоанализатор ТП-1120 предназначен для измерения водорода в газовых смесях, ТП-5005 — воздуха (кислорода) в водороде, ТП-2220 — углекислого газа в газовых смесях.

§ 5. Приборы для определения загазованности производственных помещений

В целом ряде технологических производственных процессов применяют как взрывоопасные газы, так и токсичные вещества, оказывающие вредное воздействие на организм человека.

В СССР разработаны нормы предельной концентрации вредных газов и паров, допустимой в производственных помещениях (табл. 14), и нормы границ взрываемости смесей газов и паров с воздухом (табл. 15). Существуют два предела взрывоопасной концентрации горючих газов с воздухом: нижний и верхний.

Нижний предел взрывоопасной концентрации (НВП) — *это минимальная концентрация взрывоопасного газа в воздухе (или другом газе), при которой от внешнего воздействия уже может произойти взрыв.*

Верхний предел взрывоопасной концентрации (ВВП) — *это максимальная концентрация взрывоопасного газа в воздухе (или другом газе), при которой от внешнего воздействия еще может произойти взрыв (на пределе горения).*

Для охраны здоровья трудящихся и техники безопасности на производстве разработана целая серия автоматических приборов, позволяющих непрерывно контролировать загазованность производственных помещений при применении взрывоопасных и токсичных газов и их паров. Указанные сигнализаторы имеют устройства, позволяющие включать звуковую и световую сигнализации при нижних пределах взрывоопасных концентраций или появлении ток-

сичных газов и паров. В некоторых производствах с помощью газоанализаторов автоматически отключается технологическое оборудование или включается приточная и вытяжная вентиляция.

Наиболее распространенными типами газоанализаторов являются газоанализаторы, основанные на тепловом эффекте реакции, т. е. реакции, сопровождающейся изменением температуры. Выделившаяся теплота повышает температуру чувствительных элементов. При определенных условиях повышение температуры является мерой концентрации определяемого газа. Датчики газоанализаторов имеют четыре чувствительных элемента, которые собирают в мостовую схему, подобно газоанализаторам типов ТП и МН. Два элемента находятся в открытых проточных стеклянных ампулах, через которые проходит контролируемая газовая смесь, а два других — запаяны в ампулы с газовой смесью, соответствующей началу шкалы прибора.

Анализируемая смесь проходит через чувствительные элементы (см. рис. 136) с проточными ампулами *1*. Платиновая нить *2* закреплена на выходах *3* и *4*. В зависимости от определяемого компонента платиновая нить должна иметь определенный температурный режим в пределах 300—700 °С, поддерживаемый током электрической схемы.

За счет катализатора — платиновой нити, нагретой до требуемой температуры, происходит тепловая реакция «сгорания» контролируемой газовой смеси. Выделившаяся при этом теплота повышает температуру нагретой током платиновой нити пропорционально концентрации определяемого компонента. Изменение температуры контролируется по изменению сопротивления рабочих чувствительных элементов мостовой схемы В качестве вторичных приборов применяют автоматические и сигнализирующие мосты типов МС, КСМ и др., шкала которых отградуирована в объемные проценты измеряемого взрывоопасного компонента.

Газоанализатор типа ТП-1116 (рис. 139, *а*) используется для непрерывного измерения водорода в воздухе производственных помещений в пределах от 0 до 6 объемных процентов в четырех точках отбора (помещениях). Основная погрешность измерения — не более ±2,5%.

Принцип действия прибора основан на использовании высокой теплопроводности водорода по отношению к другим компонентам анализируемой газовой смеси.

Датчик газоанализатора подобен датчику газоанализатора типов МЗ и ТП и имеет компенсационно-мостовую измерительную схему, состоящую из двух мостов — рабочего и сравнительного. Чувствительными элементами датчика являются остеклованные платиновые нити, нагреваемые током электрической схемы.

Если в воздухе помещения появляется водород, то изменяется теплопроводность газовой смеси водород — воздух, поэтому изменяется температура и электрическое сопротивление чувствительных элементов. Вследствие этого возникает разбаланс мостов, в измерительных диагоналях появляются напряжения, отношение кото-

рых измеряет электронный показывающий прибор, шкала которого выражена в объемных процентах водорода (от 0 до 6%).

На рис. 139, *б* представлена газовая схема газоанализатора типа ТП-1116. Контролируемый воздух из четырех помещений просасы-

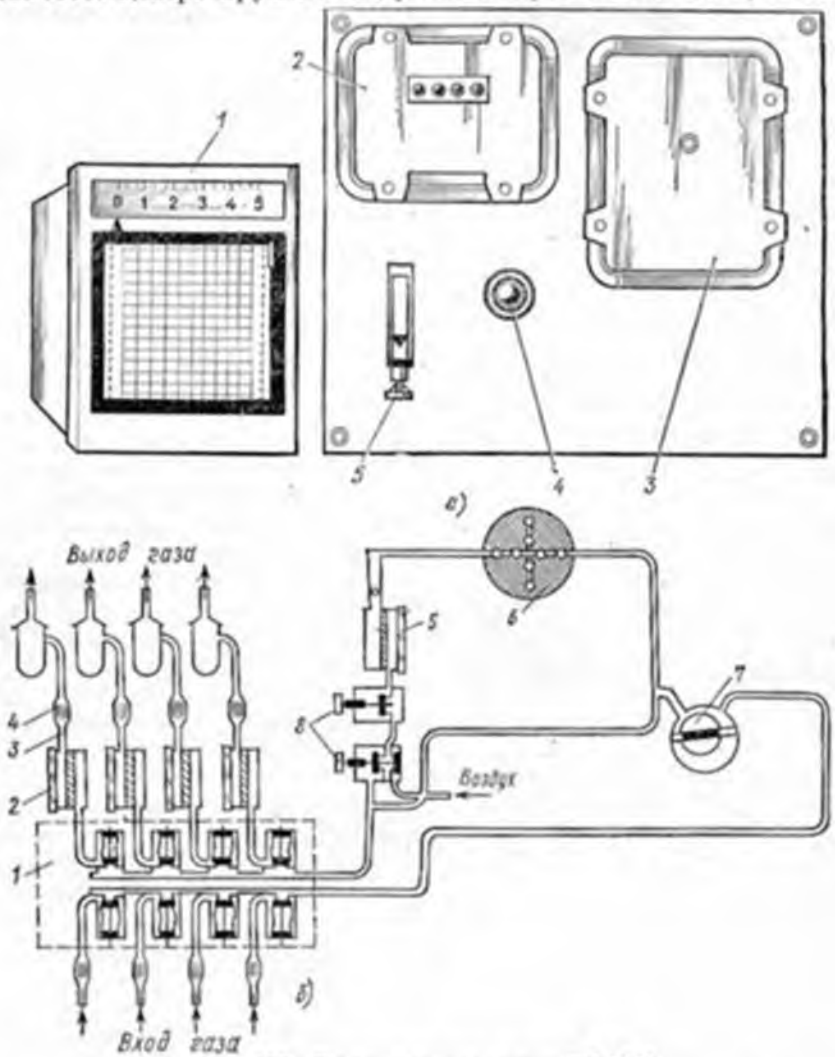


Рис. 139. Газоанализатор типа ТП-1116:

а — общий вид: *1* — регистрирующий прибор, *2* — компаратор, *3* — электроблок, *4* — фильтр, *5* — ротаметр; *б* — газовая схема: *1* — блок распределения газа, *2* — фильтр, *3* — трубки, *4* — огнепреградитель, *5* — ротаметр, *6* — датчик, *7* — побудитель расхода, *8* — вентили

вается с помощью побудителя расхода *7* по импульсным трубкам *3* через блок распределения *1*. Ротаметр *5* служит для измерения расхода. Датчик *6* содержит блок чувствительных элементов рабочего

и сравнительного мостов. Ротаметр позволяет устанавливать и контролировать постоянный расход анализируемой среды через газовую схему прибора (0,7 л/мин). Блок распределения автоматически через каждые две минуты поочередно переключает контролируемые точки (помещения). Полный цикл определения загазованности четырех помещений 8 мин.

Для предотвращения взрыва и распространения пламени в импульсных газовых линиях прибора устанавливаются огнепреградители *4*.

Прибор имеет четырехламповое табло световой сигнализации и измерительный прибор, позволяющие дублировать показания и световую индикацию обхода точек отбора (помещений) на расстояние до 100 м.

Сигнализаторы загазованности помещений типов СТХ, СВК-3М предназначены для определения и сигнализации загазованности производственных помещений взрывоопасными и горючими газами и парами.

Сигнализатор типа СВК-3М представляет собой автоматический показывающий и сигнализирующий непрерывно действующий прибор. *Принцип действия прибора основан на определении теплового эффекта сгорания горючих газов и паров на поверхности чувствительных элементов, выполненных в виде цилиндров из оксида алюминия, внутри которых установлена платиновая нить.*

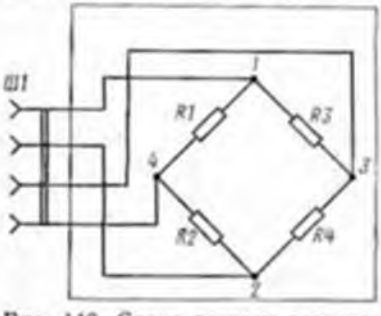


Рис. 140. Схема датчика газоанализатора типа СВК

Электрическая схема (рис. 140) датчика сигнализатора загазованности имеет измерительный мост, состоящий из четырех сопротивлений. Сопротивления *R1* и *R2* являются чувствительными элементами.

Через измерительный элемент *R1* пропускается контролируемая газовая среда при строго определенном расходе, равном 42 л/ч. Сопротивление *R2* является сравнительным элементом, который герметично закрыт и расход контролируемой среды через элемент отсутствует. Сопротивления *R3* и *R4* представляют собой постоянные резисторы, выполненные из манганинового провода ($R3=R4=65\pm0{,}1$ Ом).

При появлении горючих газов в воздухе контролируемого помещения на рабочем чувствительном элементе *R1* происходит окисление горючего газа, при этом повышается температура элемента и электрическое сопротивление платиновой спирали увеличивается. Нарушается условие равновесия измерительного моста *R1—R4* и в измерительной диагонали моста (цепь *3—4* разъема *Ш1*) возникает разность потенциалов, пропорциональная объемной концентрации горючего газа.

Для усиления незначительного выходного сигнала с измерительного

ной мостовой схемы применен двухкаскадный усилитель переменного тока на двух транзисторах, нагрузкой которого является измерительный стрелочный прибор, показывающий загазованность производственного помещения.

Схема датчика сигнализатора типа СВК-3М показана на рис. 141. Эжектор *1*, запитанный давлением сжатого воздуха через фильтр *8* и редуктор *7*, под действием разрежения просасывает через датчик *3* анализируемый газ, расход которого контролируется ротаметром *2*. Двухходовой кран *6* переключается в два положения: «анализ», при котором контролируется загазованность контролируемого помещения, и «контроль», при котором производится проверка нуля прибора по воздуху.

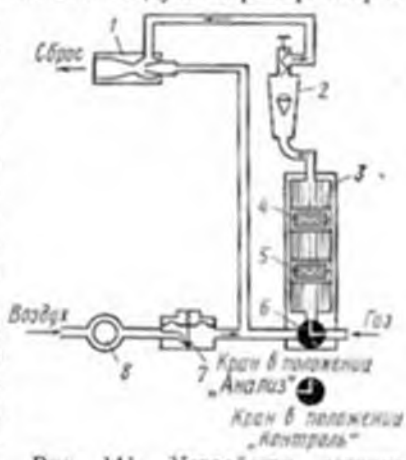


Рис. 141. Устройство датчика сигнализатора типа СВК:
1 — эжектор, *2* — ротаметр, *3* — датчик, *4* — сравнительный элемент, *5* — рабочий элемент, *6* — кран, *7* — редуктор, *8* — фильтр

Для предотвращения выхода из строя рабочего чувствительного элемента *5* при большой концентрации горючего газа электрической схемой предусмотрено автоматическое отключение датчика с одновременным включением сигнала «взрывоопасная концентрация».

При обрыве цепи питания датчика или перегорании чувствительных элементов реле контроля своими контактами выдает сигнал «Неисправность».

Электрическая схема газоанализатора типа СВК-3М дана на рис. 142.

Стабилизатор тока для питания блока датчика *R1—R4* питается от вторичной обмотки *14—16* силового трансформатора *Тр1*. Диоды *Д16—Д17* и конденсатор *С7* представляют собой выпрямитель со стабилизатором тока на транзисторах *Т5*, *Т6* и диоде *Д18*.

При загазованности помещения нарушается условие равновесия моста *R1—R4* датчика и напряжение постоянного тока, пропорциональное величине концентрации горючего газа (пара), поступает на модулятор — триоды *Т1*, *Т2*, где сигнал преобразуется в переменное напряжение.

Двухкаскадный усилитель на транзисторах *Т3*, *Т4* усиливает этот сигнал, который поступает на диод *Д8*, выпрямляется, а затем поступает на стрелочный индикатор *И*. Этот же сигнал с двухкаскадного усилителя *Т3*, *Т4* поступает на релейный усилитель, собранный транзисторами *Т7*, *Т8*, который предназначен для управления реле *Р3*, *Р4* и выдачи сигнала до взрывоопасной концентрации.

При обрыве при перегорании плечевых чувствительных элементов и обрыве цепи питания измерительного моста *R1—R4* реле *Р2* срабатывает и контактами *3—4* рвет цепь обмотки реле *Р1*, контак-

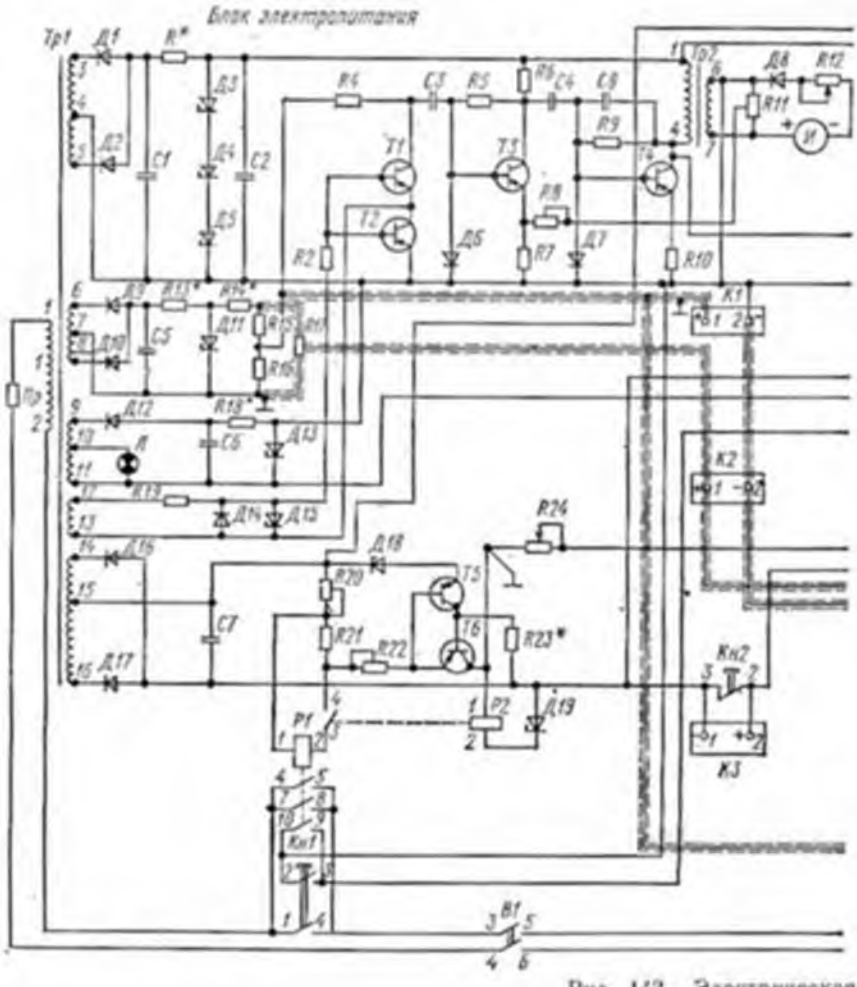


Рис. 142. Электрическая

тами *12—13* которого осуществляется сигнализация «Неисправность» прибора.

По шкале стрелочного прибора *И* визуально наблюдают за изменением загазованности контролируемого объекта.

§ 6. Деполяризационные и термохимические газоанализаторы

Деполяризационный газоанализатор типа ГДРП-3 используют для определения содержания кислорода в горючих или инертных газах. Прибор выпускается на один из пяти пределов: 0—0,1; 0—0,2; 0—0,5; 0—1; 0—2 об.% кислорода.

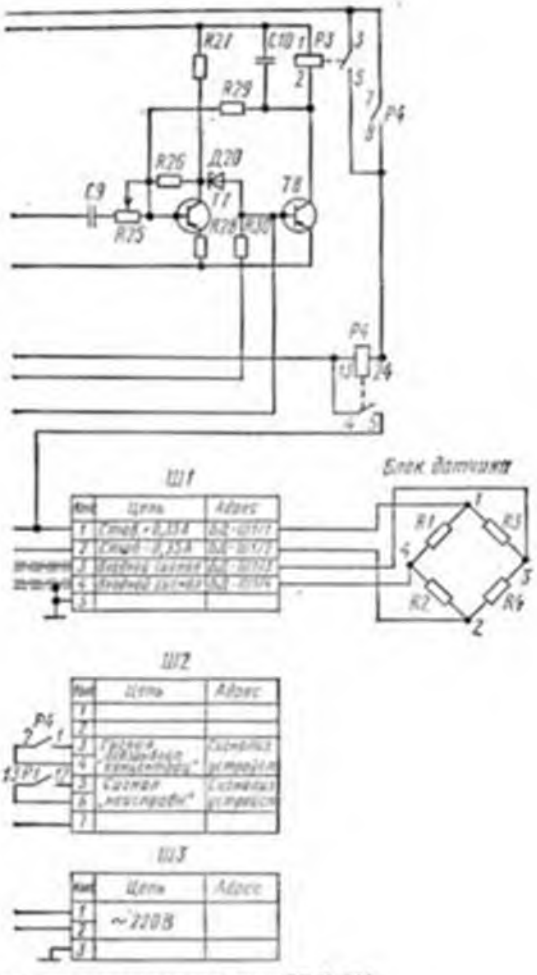


схема сигнализатора типа СВК-3М

Принцип действия прибора основан на деполяризующем влиянии кислорода на погруженный в электролит поляризованный электрод.

Датчик *1* (рис. 143) прибора имеет электрохимическую ячейку *2* с раствором сернокислого натрия (Na_2SO_3), через который пропускается анализируемый газ со строго определенным расходом, равным 30 л/ч. В ячейке находятся два золотых электрода — анод и катод, поляризованные приложенным напряжением. При отсутствии кислорода в контролируемом газе ток в цепи прибора практически отсутствует. *При появлении кислорода на золотом катоде происходит его частичная деполяризация, в цепи электродов возникает диффузионный ток, величина которого пропорциональна количеству*

диффундирующего (проникающего) к катоду кислорода. Таким образом, в цепи электродов при наличии кислорода в газе протекает электрический ток, величина которого пропорциональна содержанию кислорода.

Так как изменение температуры электролита влияет на точность показаний прибора, схемой предусмотрена автоматическая стабилизация температурного режима электролита в пределах 40±1 °С с помощью электроконтактного термометра *4* и нагревателя *5*.

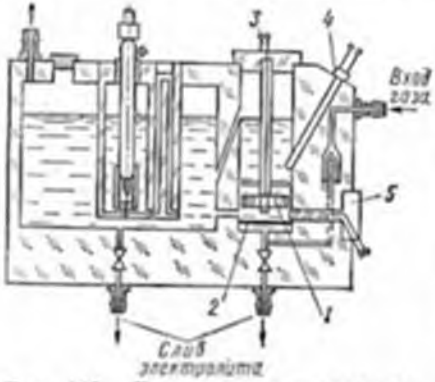


Рис. 143. Датчик газоанализатора типа ГДРП-3:

1 — датчик, *3* — электрохимическая ячейка, *3* — выводы, *4* — термометр, *5* — нагреватель

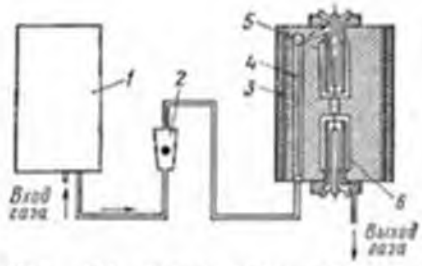


Рис. 144. Схема газоанализатора типа ТХГ-5М:

1 — регулятор расхода, *2* — ротаметр, *3* — корпус, *4* — теплообменник, *5* — сравнительная камера, *6* — рабочая камера

Золотые электроды питаются стабилизированным напряжением 1,95±0,005 В.

В качестве вторичного прибора применяется электронный потенциометр типа КСП, шкала которого выражена в объемных процентах кислорода.

Анализируемый газ должен иметь на входе в газовую схему прибора следующие параметры: давление 4—10 кПа (400—1000 мм вод. ст.), температуру 5—40 °С.

Основная погрешность прибора составляет ±5% от верхнего предела измерения.

Термохимический газоанализатор типа ТХГ-5М применяется для определения кислорода в водороде, в генераторном газе, а также водорода в кислороде.

Принцип действия газоанализатора основан на измерении теплового эффекта реакции кислорода с водородом, протекающей в присутствии катализатора — палладия — при начальной температуре 200±5 °С.

Схема газоанализатора типа ТХГ-5М показана на рис. 144. Контролируемый газ после предварительной очистки и осушки поступает на регулятор расхода *1*, обеспечивающий постоянный расход газа через газовую схему прибора, равный 60 л/ч. Расход газа контролируется ротаметром *2*. Газ, проходя через теплообменник *4*, по-

ступает в камеру *5* сравнительного элемента, а затем в рабочую камеру *6* элемента и выходит через штуцер «Выход газа».

Рабочий элемент заполнен катализатором, а сравнительный элемент — неактивной массой.

Электрическая схема газоанализатора типа ТХГ-5М представлена на рис. 145. В датчике установлены сопротивления рабочего

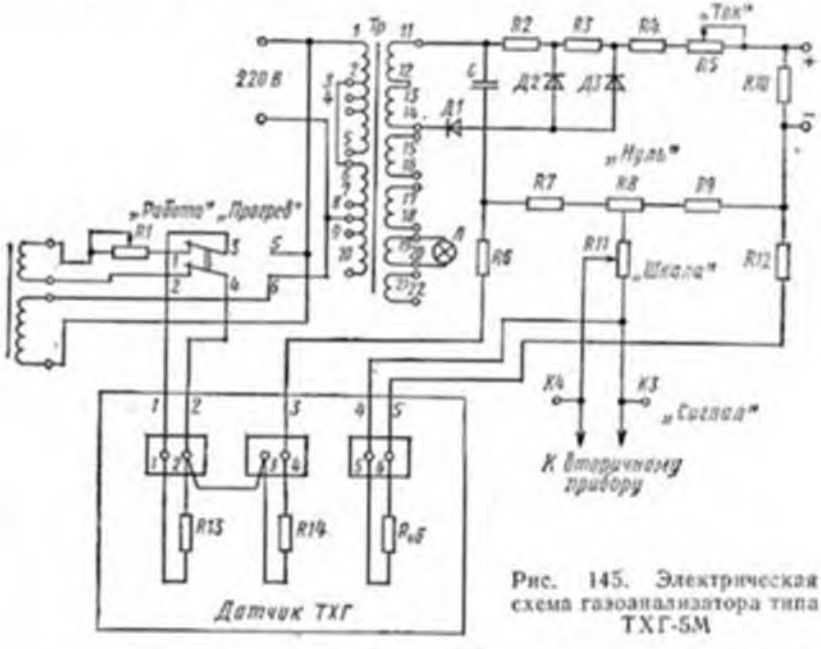


Рис. 145. Электрическая схема газоанализатора типа ТХГ-5М

элемента *R13* и сравнительного элемента *R14*, являющиеся двумя плечами моста. Постоянные проволочные сопротивления *R7* и *R8* образуют два других плеча измерительного моста. Спираль обогрева корпуса датчика $R_{об}$ с помощью тумблера *B2* может подключаться на ускоренный режим обогрева при напряжении 220 В в положении «Прогрев» и на стабилизированное напряжение 127 В в положении «Работа». Потенциометром *R5* производится настройка тока питания мостовой схемы в пределах 20±0,1 мА. Резистор *R8* обеспечивает установку нуля шкалы, а *R11* — конца шкалы вторичного прибора.

Вторичным прибором газоанализатора является электронный автоматический потенциометр КСП-3, шкала которого выражена в объемных процентах измеряемого газа.

При отсутствии кислорода в водороде или водорода в кислороде (в зависимости от модификации газоанализатора) измерительный мост, образованный сопротивлениями *R13*, *R14*, *R7*, *R8*, уравновешен (сопротивления по величине равны друг другу), поэтому ток в измерительной диагонали (зажимы *K3—K4*) практически отсутствует.

При появлении в газе измеряемого компонента на рабочем элементе *R13* в присутствии катализатора выделяется дополнительная теплота и изменяется электрическое сопротивление элемента. При этом мост разбалансируется и в измерительной диагонали появляется ток, величина которого пропорциональна содержанию измеряемого газового компонента.

Основная погрешность прибора составляет ±5% от диапазона измерения. Прибор выпускается на один из трех пределов измерения: 0—0,5; 0—1; 0—2 об.%.

§ 7. Оптико-акустические приборы

Оптико-акустические приборы нашли широкое применение для определения оксида углерода (угарного газа), диоксида углерода (углекислого газа) и метана в газовых смесях. Приборы используют в химической, металлургической, машиностроительной, электронной, газовой и нефтеперерабатывающей промышленности, а также научных исследованиях в биофизике, геохимии, медицине и биологии.

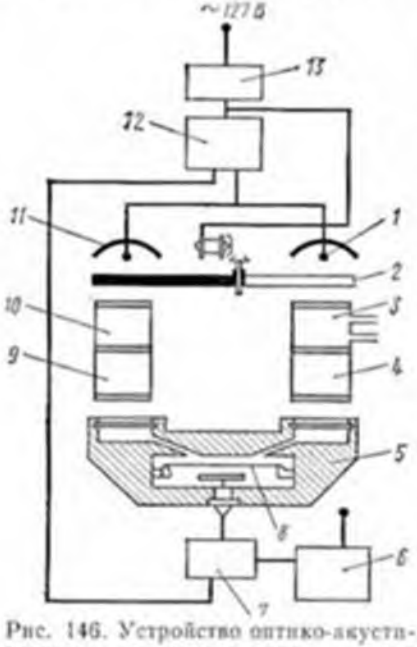


Рис. 146. Устройство оптико-акустического газоанализатора типа ОА-5501:

1 — излучатель, *2* — обтюратор, *3* — рабочая камера, *4*, *9* — фильтровые камеры, *5* — мерная камера, *6* — прибор, *7* — усилитель, *8* — микрофон, *10* — сравнительная камера, *11* — отражатель, *12* — блок питания, *13* — стабилизатор

Принцип действия прибора основан на поглощении анализируемым газом потока инфракрасного излучения, создаваемого нихромовыми излучателями.

Закон Ламберта — Бера выражает зависимость поглощения излучения определенной длины волны от концентрации поглощаемого вещества и толщины слоя, в котором происходит поглощение: $E=KCd$, где E — экстинция (поглощение радиации); K — коэффициент поглощения; C — концентрация поглощающего вещества; d — толщина слоя.

Степень поглощения радиации пропорциональна концентрации измеряемого компонента в газовой смеси.

В оптико-акустическом газоанализаторе типа ОА-5501 (рис. 146) в качестве измерительной схемы используется дифференциальная (сравнительная) оптическая схема с непосредственным отсчетом. Два нихромовых излучателя *1*, нагретых до температуры 600—800 °С, являются источниками инфракрасного излучения. Потоки радиации, отражаясь от металлических полированных параболических отра-

жателей *11*, поступают в две оптические системы. Обтюратор *2* поочередно (с частотой 5 Гц) перекрывает два потока радиации, вызывая колебания температуры и давления газов в камерах.

В правой оптической системе установлена рабочая камера *3*, через которую проходит анализируемая газовая смесь с расходом, равным 0,3—0,7 л/мин. В левой оптической системе установлена сравнительная герметически закрытая камера *10*, заполненная чистым азотом с полным отсутствием измеряемого компонента.

Фильтровые камеры *4*, *9* устанавливаются в левой и правой оптических системах для уменьшения влияния сопутствующих неизмеряемых газовых компонентов.

Чувствительным элементом прибора является мерная камера *5*, рабочая полость заполнена смесью аргона с определяемым компонентом. Например, если газоанализатор используется на определение диоксида углерода, то мерная камера заполняется смесью аргона

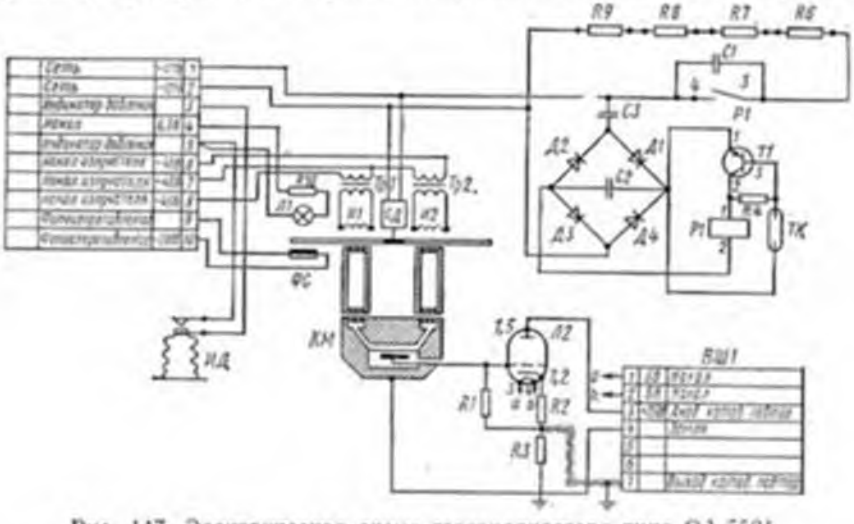


Рис. 147. Электрическая схема газоанализатора типа ОА-5501

с диоксидом углерода. В нижней части мерной камеры установлен конденсаторный микрофон *8*, мембрана которого является одной из обкладок конденсатора.

Если определяемый компонент в рабочей камере отсутствует, то потоки радиации и колебания их давлений в левом и правом лучеприемниках равны друг другу, поэтому конденсаторный микрофон находится в покое. При появлении измеряемого компонента в измерительной камере поток радиации в правом лучеприемнике поглощением части радиации уменьшается. В результате разности радиации левого и правого потоков возникает переменное давление в месте расположения мембраны микрофона, мембрана начинает колебаться и изменять емкость конденсаторного микрофона. Амплитуда колебаний мембраны зависит от концентрации определяемого компонента. Колебания мембраны преобразуются микрофоном в

электрический сигнал переменного тока, который после ряда преобразований регистрируется вторичным прибором — автоматическим потенциометром типа КСП, шкала которого выражена в объемных процентах измеряемого компонента.

Электрическая схема газоанализатора типа ОА-5501 показана на рис. 147. Нагреватели излучателей *И1* и *И2* получают напряжение через трансформаторы *Тр1* и *Тр2*; синхронный двигатель *СД* приводит в движение обтюратор с частотой 5 Гц, который прерывает поток инфракрасной радиации. Питание электрической схемы приемника осуществляется от электроблока. Конденсаторный микрофон *КМ* имеет микрофонный каскад, собранный по схеме катодного повторителя на лампе *Л2* (6С1П).

При колебаниях мембраны на выходе катодного повторителя появляется электрический сигнал, пропорциональный концентрации определяемого компонента.

На микрофон через сопротивление *R3* подается поляризующее напряжение 90 В. Сопротивление *R1* является нагрузочным сопротивлением микрофона. На аноде катодного повторителя поддерживается напряжение постоянного тока 150 В.

Катодный повторитель представляет собой каскад усиления с нагрузкой *R1* в цепи катода, поэтому его можно рассматривать как усилитель без обратной связи, который усиливает напряжение, приложенное между сеткой и катодом.

§ 8. Измерители влажности и запыленности

Измерители влажности. Влажность является одной из существенных характеристик материалов и сырья, используемых в различных отраслях народного хозяйства. От влажности зависят механические, физические, химические и технологические свойства неметаллических материалов, поэтому в целом ряде производств используются процессы увлажнения и осушки, предназначенные для поддержания требуемой влажности материалов.

В электронной, газовой, металлургической и машиностроительной промышленности существенное значение имеет контроль и регулирование влажности чистых газов — водорода, азота, кислорода, аргона и др., которые существенно влияют на качество выпускаемой продукции.

Существуют две безразмерные характеристики влажности: влажность и влагосодержание.

Влажность (массовая) W — это отношение массы влаги M, содержащейся в материале, к массе M_1 влажного материала: $W = M/M_1$.

Влагосодержание (массовое) U — отношение массы влаги M, содержащейся в материале, к массе M_0 абсолютно сухого материала: $U = M/M_0$.

В целом ряде производств эти величины выражают через массу или в процентах:

$$U = \frac{P - P_0}{P_0} \cdot 100\%; \quad W = \frac{P - P_0}{P_0} \cdot 100\%,$$

где P — масса влажного тела, P_0 — масса абсолютно сухого тела.

При измерении сверхмалых значений влаги (микроконцентраций) в газах и жидкостях в качестве единицы измерения объемного влагосодержания принимают международную единицу измерения *ppm* — единицу влагосодержания, когда в миллионе молекул газа или жидкости находится одна молекула воды.

Электронный психрометр типа ПЭ используется для автоматического непрерывного измерения, регулирования и записи относительной влажности воздуха и газов. Принцип действия прибора основан на определении разности температур «сухого» и «мокрого» термометров сопротивлений, зависящей от влажности, барометрического давления и температуры среды.

Проходящий через датчик анализируемый воздух или газ обтекает термометры сопротивления, причем «мокрый» термометр смачивается с помощью «чулка» дистиллированной водой.

«Сухой» и «мокрый» термометры с двумя постоянными проволочными резисторами образуют мост. Диагональ питания моста питается напряжением постоянного тока. При равновесии моста ток в измерительной диагонали отсутствует.

С изменением влажности газа «мокрый» термометр сопротивления изменяет свое электрическое сопротивление — мост разбалансируется и в измерительной диагонали возникает разность потенциалов, пропорциональная разности температур «сухого» и «мокрого» термометров сопротивлений, которая измеряется вторичным электронным прибором типа КСМ. Шкала прибора отградуирована в процентах относительной влажности.

Кулонометрический измеритель типа «Байкал» применяется для автоматического контроля и регулирования микроконцентрации влаги в газах.

Принцип действия прибора основан на непрерывном поглощении влаги из измеряемого газа пленкой гигроскопического вещества (пентаксид фосфора) и электролитическом разложении поглощенной влаги на водород и кислород.

Основным элементом прибора является кулонометрический измерительный элемент (рис. 148), представляющий собой стеклянный толстостенный цилиндр *1*, во внутреннем канале которого находятся три платиновых электрода *2*, выполненные в виде несоприкасающихся спиралей. Между электродами нанесена пленка гигроскопического вещества *3* — пентаксида фосфора (P_2O_5). Измерительный элемент имеет рабочий и контрольный элементы. Через внутренний канал элемента проходит анализируемый газ со строго постоянным расходом, равным 50 см³/мин. *При таком расходе влага из газа полностью извлекается пентаксидом фосфора и под действием приложенного к электродам напряжения постоянного тока одновременно с поглощением влаги происходит ее электролиз, поэтому ток электролиза является мерой содержания влаги в анализируемом газе.*

Схема прибора «Байкал» представлена на рис. 149. Для уменьшения инерционности прибора большая часть измеряемого газа сбрасывается через специальное отверстие — дроссель *7*.

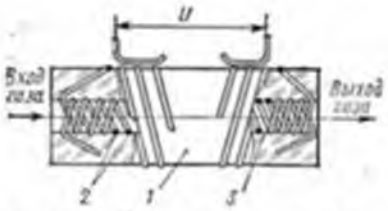


Рис. 148. Кулонометрический измерительный элемент влажности

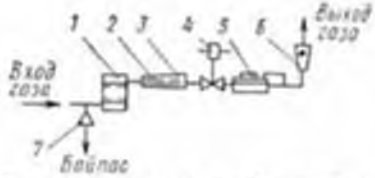


Рис. 149. Схема прибора «Байкал»

Поток газа проходит фильтр тонкой очистки *1*, рабочий *2* и контрольный *3* чувствительные элементы. Для поддержания строго дозированного расхода газа через газовую измерительную схему прибора установлен регулятор расхода *5*. Ротаметр *6* является индикатором расхода.

Электрической схемой прибора предусмотрен электромагнитный клапан *4*, который служит для защиты чувствительных элементов от переувлажнения и от выноса пентаксида фосфора или при попадании в прибор газов с влажностью, превышающей максимальный предел измерения прибора, а также при отключении питающего напряжения.

Структурная схема измерителя влажности «Байкал» представлена на рис. 150, *б*. Чувствительный элемент *Д* питается стабилизированным напряжением постоянного тока. Измерение тока электролиза воды в данном элементе, т. е. определение влажности измеряемого газа в пределах 10—1000 *ppm*, обеспечивается непосредственно автоматическим потенциометром *ИП* типа КСП, шкала которого отградуирована в единицах микроконцентрации влаги (*ppm*).

Усилитель постоянного тока *УПТ* усиливает сигнал чувствительного элемента при измерении влажности газов на пределах 0—5, 0—2 *ppm*, т. е. когда ток электролиза в чувствительном элементе настолько мал, что без усиления его невозможно зарегистрировать прибором *ИП*.

Переключатель диапазонов *П* служит для переключения пределов измерения прибора в диапазонах 0—1000 *ppm*.

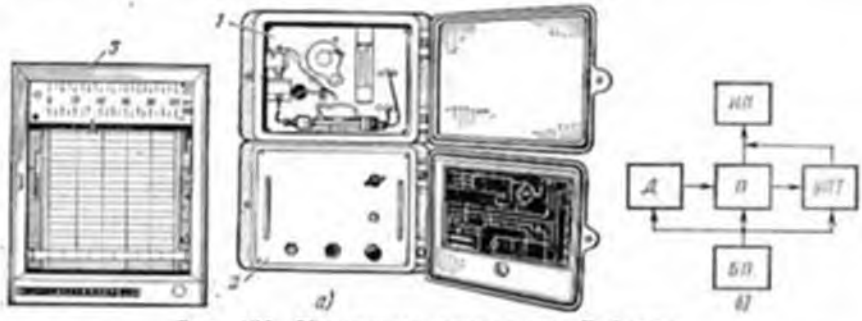


Рис. 150. Измеритель влажности «Байкал»:
а — общий вид, *б* — структурная схема; *1* — датчик, *2* — блок питания, *3* — прибор

Блок питания *БП*, включающий силовой трансформатор и три выпрямителя, собранных по мостовой схеме, предназначен для питания измерительной схемы прибора, электромагнитного клапана газовой схемы и усилителя постоянного тока *УПТ*.

В процессе эксплуатации прибора необходимо контролировать и устанавливать расход газа, равный 50 см³/мин, через чувствительный элемент.

Через 1250 ч работы влагомера требуется заменять фильтрующий элемент в фильтре тонкой очистки газа.

Влагомер к газовым сетям подключают нержавеющей стальной трубкой (материал Х18Н9Т) диаметром 3 мм с максимально допустимой длиной 40—60 см.

Измерители запыленности. Осуществляют контроль запыленности воздушной среды, технологических газов и концентрации

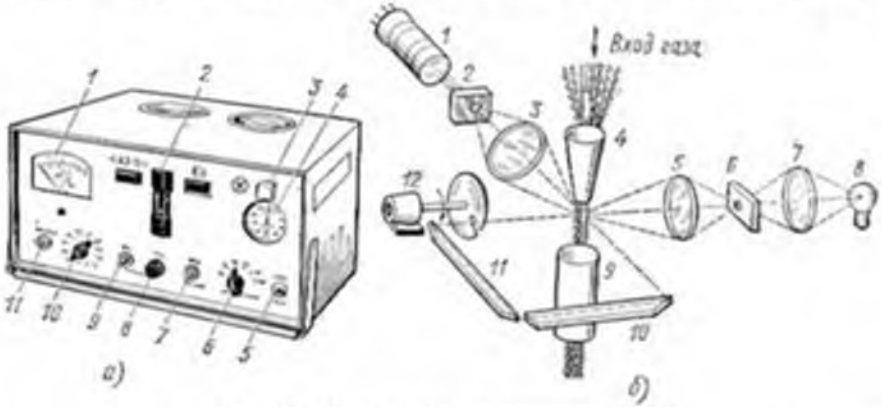


Рис. 151. Измеритель запыленности АЗ-5:

а — общий вид: 1 — счетчик, 2 — ротаметр, 3 — сброс показаний, 4 — счетчик, 5 — кнопка «Пуск», 6 — переключатель диапазонов, 7 — включение счетчика, 8 — регулятор расхода, 9 — включение насоса, 10 — размер частиц, 11 — тумблер «Сеть», б — оптическая схема прибора: 1 — фотоумножитель, 2, 6 — диафрагмы, 3, 5, 7 — объективы, 4 — сопло, 8 — источник света, 9 — трубка, 10, 11 — волноводы, 12 — модулятор света

аэрозольных частиц. В часовой, оптической, электронной промышленностях существуют определенные нормы запыленности воздуха и газов на участках монтажа, сборки и испытаний изделий.

Превышение допустимых норм запыленности технологического газа приводит к браку изделий.

Анализатор запыленности АЗ-5 (рис. 151, *а*) используется для определения запыленности воздуха и технологических газов, для проверки эффективности работы технологических воздушных и газовых фильтров, определения концентрации аэрозоля в воздушном бассейне, определения источника запыленности аэрозольными частицами.

Прибор представляет собой фотоэлектрический счетчик аэрозольных частиц и позволяет измерять концентрации пыли от 1 до 300 000 частиц в литре. В приборе имеется переключатель размера

регистрируемых частиц соответственно: 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,5; 2; 4; 7; 10 мкм.

Прибор имеет два канала измерений: канал дозированного измерения и канал непрерывного измерения. Канал дозированного измерения применяется для определения концентрации от 1 до 250 частиц в литре. Время цикла измерения 50±2 с. Расход анализируемой среды за это время — один литр. При больших концентрациях используется канал непрерывного измерения (250—300 000 частиц).

Принцип работы прибора основан на рассеивании света измеряемыми аэрозольными частицами. При этом существует количественная зависимость между размерами частиц и интенсивностью рассеянного света.

Основными элементами прибора являются оптический датчик и электрический блок.

На рис. 151, *б* показана схема оптического датчика анализатора запыленности АЗ-5.

Анализируемая пыль просасывается через сопло *4* в измерительную полость с постоянным расходом, определяемым по ротаметру, и выходит из датчика через трубку *9* вывода аэрозоля. Перпендикулярно измерительной полости расположены источник света *8*, два объектива *5*, *7* и диафрагма *6*, создающие сфокусированный световой луч. Под прямым углом к нему установлены объектив *3* и диафрагма *2*, которые образуют луч, направленный от источника света *8* к фотоумножителю *1*. Световые волноводы (призмы) *10*, *11* и прерыватель (модулятор) светового потока *12* служат для контроля и калибровки размеров частиц пыли.

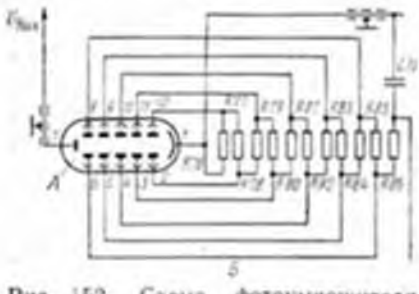


Рис. 152. Схема фотоумножителя ФЭУ с делителем напряжения прибора АЗ-5:

А — фотоумножитель, *Б* — делитель напряжения

Фотоумножитель *А* (рис. 152) представляет собой прибор, состоящий из фотокатода *1*, анода *7* и системы динодов *2—12*, позволяющих производить умножение «входных» электронов за счет явления вторичной электронной эмиссии. После первого динода *2* вылетает уже большее количество электронов, увеличиваясь на последующих динодах, количество электронов усиливается во много раз (в пределах 10^5—10^8), поэтому на аноде *7* может возникнуть существенный фототок.

Питание фотоэлектрического умножителя ФЭУ подается через делитель напряжения, распределяющий напряжение постоянного тока между динодами *2—12*. Если в измерительной полости пыль отсутствует, то фототок ФЭУ практически отсутствует.

При попадании пыли в измерительную камеру появляется рассеянный свет от их частиц и на выходе ФЭУ возникает электрический сигнал, длительность которого равна времени пролета частицы

через полость; а амплитуда сигнала определяется размером частиц.

Количество пыли в зависимости от измеряемого предела определяется по электромеханическому счетчику или по шкале показывающего прибора, которая отградуирована в единицах измерения запыленности (частиц/л).

§ 9. Концентратомеры

Концентратомеры позволяют контролировать концентрацию вещества в водных растворах. Концентрация выражается в процентном или весовом содержании вещества в единице объема воды (%, мг/л).

Концентратомеры в зависимости от назначения разделяются на солемеры, концентратомеры и др.

Солемеры применяются для определения солесодержания в технической воде, в водных растворах, в конденсате турбин и в паре котлов. Наличие даже незначительного содержания солей в паротурбинных установках и котлах ухудшает эксплуатационный режим теплоэнергетических установок — в оборудовании появляется накипь, что приводит к увеличению удельных норм расхода топлива, а также к авариям трубопроводов из-за накипи в местах перегрева. Для борьбы с такими явлениями производят химводоочистку, т. е. удаление солей, кислот и т. п.

Солемер типа СС работает на принципе изменения электропроводности солевого раствора. Чем меньше содержание соли, тем больше электрическое сопротивление раствора. Прибор обеспечивает сигнализацию предельного значения солесодержания.

Датчиком прибора является сосуд с двумя электродами, который заполнен контролируемым раствором. При изменении температуры раствора изменяется его электропроводность (при изменении температуры на 10 °С электропроводность меняется на 25%), поэтому для устранения этого влияния в приборе предусмотрена температурная компенсация. Прибор имеет ряд существенных недостатков: при загрязнении и поляризации электродов, а также при наличии в растворе примесей кислот и солей погрешность измерений возрастает. Измерение электропроводности раствора производится по схеме моста переменного тока, в котором электроды датчика составляют одно плечо моста, остальные сопротивления являются постоянными сопротивлениями моста.

При отсутствии солей в воде мост уравновешен и в измерительной диагонали ток отсутствует. Чем больше солесодержание в водном растворе, тем больше разбалансирован мост и больше ток в измерительной диагонали, а следовательно и в измерительном приборе. Таким образом, ток в приборе является мерой солесодержания.

Солемер СС применяют в широком диапазоне измерения солесодержания от 0,05 до 1000 мг/л. Температура контролируемой среды должна быть 15—85 °С. Основная погрешность прибора ±3% от верхнего предела измерения.

Концентратомеры применяют для определения концентрации кислот и щелочей в технологических процессах очистки и нейтрализации производственных стоков, растворов и пульп.

Датчики концентратомеров включаются в одно из плеч мостовой измерительной схемы подобно датчикам солемеров. При изменении концентрации растворов изменяется ток в измерительной диагонали и в измерительном приборе, шкала которого отградуирована в единицах измерения концентрации.

Наиболее распространенными типами датчиков концентратомеров являются проточные *ДПр* и погружные *ДПг*. Проточные датчики предназначаются для измерения концентрации растворов, протекающих по трубопроводам или отбираемых из аппарата; погружные — для измерения концентрации растворов в открытых и закрытых емкостях и аппаратах.

В датчиках *ДПр* и *ДПг* в качестве измерительных электродов применяют стеклянные электроды (рис. 153, *а*). Корпус электрода *4* изготовлен из калиброванной стеклянной трубки. Шарик *1*, выполненный из электродного стекла, является активной частью электрода. В корпусе *4* установлен контактный бромосеребряный электрод *3*, а в полость заливается раствор *2* бромистоводородной кислоты. Выводной проводник *5* от электрода заканчивается наконечником. Электрическая связь между контролируемым раствором и раствором, находящимся во внутренней части электрода, осуществляется по поверхности шарика *1*.

Дополнительно к основному стеклянному электроду в концентратомере используется вспомогательный проточный или непроточный электрод. Для получения более высокой точности контроля применяют датчики с проточным вспомогательным электродом.

Электродные системы датчика (рис. 153, *б*) в зависимости от концентрации раствора развивают определенную э. д. с., причем изменение температуры раствора приводит к изменению э. д. с. В связи с этим в схемах концентратомеров часто используют специальные компенсаторы.

Работа компенсатора *3* (рис. 154) сводится к следующему: последовательно с электродвижущей силой электродной системы *1*, *2* включена мостовая схема сопротивлений *R1*, *R2*, *R3* и *R4*, которая питается постоянным напряжением от сухого элемента *СЭ*. Переменным резистором *R2* напряжение компенсатора можно изменять в пределах ±50 мВ.

Если при тарировке датчика в растворе, для которого известна величина э. д. с., развиваемая электродной системой, отличается от номинальной величины, то за счет переменного резистора *R2* можно на выходе датчика установить требуемое напряжение.

В качестве преобразователя применяется высокоомный измерительный преобразователь П-261, который представляет собой прибор для преобразования выходной величины э. д. с. чувствительных элементов датчиков в выходной унифицированный сигнал постоянного тока 0—5 мА. Преобразователь используется в различных системах автоматического контроля и регулирования кон-

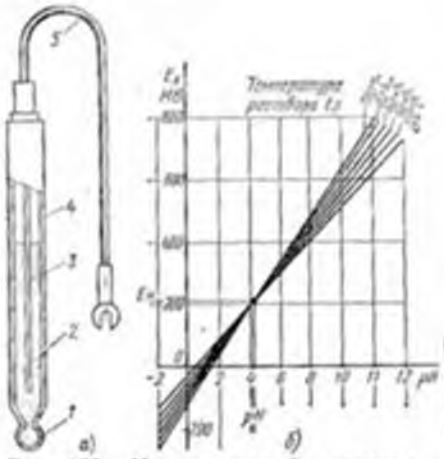


Рис. 153. Измерительный электрод концентратомера:

а — стеклянный электрод, *б* — график зависимости э. д. с. от концентрации раствора

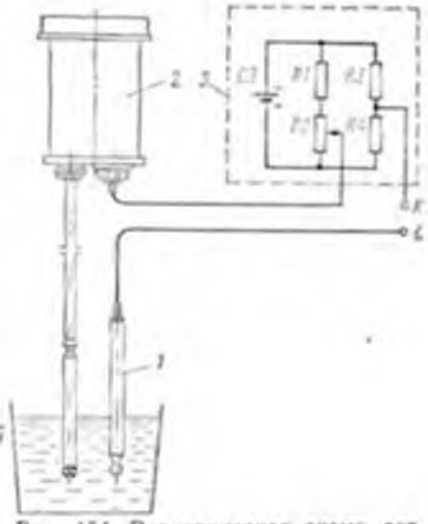


Рис. 154. Электрическая схема датчика с компенсатором

центрации растворов в различных технологических процессах. На выход преобразователя подключают автоматический самопишущий прибор с регулирующим устройством.

§ 10. Вспомогательные устройства газоанализаторов

Вспомогательные устройства служат для подготовки газов и жидкостей к подаче в анализаторы в соответствии с техническими требованиями заводов-изготовителей.

По назначению такие устройства подразделяются на следующие группы: газозаборные и пробоотборные устройства; фильтры для очистки от примесей (химических и механических); устройства регулирования давления и расхода; охладители; насосы и побудители расходов; комплексные устройства для очистки, охлаждения и регулирования.

Газозаборное устройство ГЗУ-2 применяется как для отбора пробы, так и для очистки анализируемого газа от пыли. Керамический фильтр с порами размером 70—90 мкм позволяет эффективно производить очистку газа от пыли со 120 г/нм³ на входе до 2 г/нм³ на выходе. Рабочий интервал температуры газа 100—600 °С, давление 10 кПа (0,1 кгс/см²).

Фильтры в зависимости от исходного количества пыли и механических включений подразделяются на ватные, керамические и электрические.

Ватные фильтры из ткани Петряиова используются для защиты газовых линий приборов от незначительного количества пыли в

пределах 1—10 мг/нм³; керамические — в широком интервале запыленности от 10 до 120 мг/нм³. Электрические фильтры еще не нашли широкого применения ввиду своей сложности и использования в них высокого напряжения постоянного тока в пределах 4000 — 5000 В.

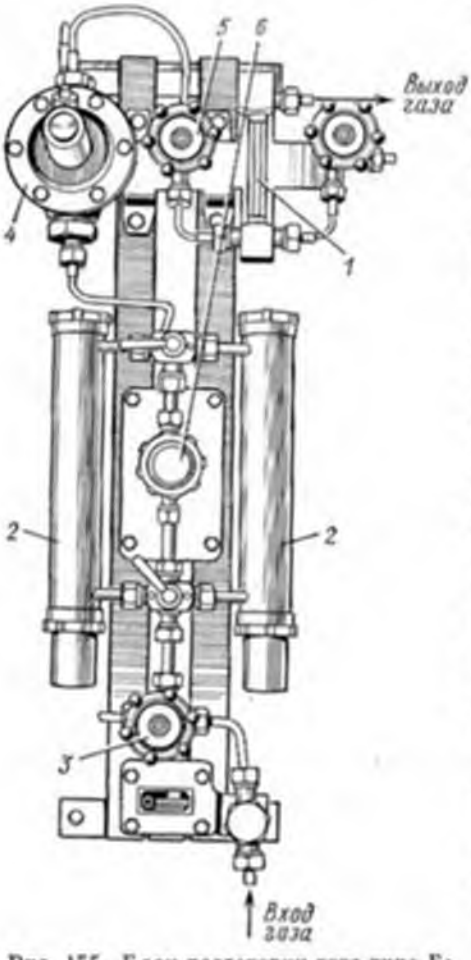


Рис. 155. Блок подготовки газа типа Б:
1 — ротаметр, *2* — патрон, *3*, *5* — вентили, *4* — регулятор давления, *6* — фильтр

Принцип действия фильтров заключается в способности газа ионизироваться в электрическом поле и заряжать механические примеси, которые затем оседают на противоположно заряженных электродах.

Газоочистное устройство типа ГОУ используется для очистки и осушки газа от вредных примесей, вызывающих дополнительную погрешность газоанализатора. Устройство имеет ряд фильтров, заполненных специальными поглотителями — цеолитом или силикагелем. На выходе устройства установлен контрольный ватный фильтр со смотровым стеклом. При насыщении и отработке поглотителя фильтр изменяет свою окраску.

Редуктор давления РД-10 используется для регулирования и понижения давления анализируемого газа и предотвращения повышения давления газа в приборе выше заданного предела с помощью предохранительного клапана. Редуктор позволяет регулировать избыточное давление от 1000 до 10 кПа (10—0,1 кгс/см²).

Холодильник типа ХК позволяет охлаждать газовую смесь и уменьшать ее влагосодержание. Максимальная рабочая температура газа на входе холодильника составляет 600 °С, на выходе — не более 40 °С, рабочее давление газовой смеси не выше 2,5 МПа (25 кгс/см²).

Блоки типа Б (рис. 155) являются комплексными устройствами и предназначены для контроля и регулирования расхода анализируемых газов. Блок позволяет производить очистку и осушку га-

зов. На выходе блока установлен ротаметр *1* с запорно-регулирующим вентилем *5* для регулирования и поддержания требуемого расхода газа через газовую схему газоанализатора. При отсутствии требуемого избыточного давления анализируемого газа, на входе в газоанализатор, применяют побудители расхода, пневматические нагнетатели или воздушные эжекторы. Регулятор давления *4* стабилизирует давление газа.

Побудитель расхода ПР-7 имеет электродвигатель, ось которого связана с ротационным насосом. При включении электродвигателя насос под действием разрежения просасывает газ через газовую схему прибора.

Воздушный эжектор типа ВЭЖ позволяет просасывать контролируемый газ через газоанализатор.

Основные выводы

1. Для обеспечения работоспособности газоанализатора в заданном классе точности необходимо выполнить основные требования: не допускать утечек в газовом тракте; настроить требуемый газовый поток (с обеспечением его стабилизации); строго соблюдать синфазность питающего напряжения датчика, блока питания и самого регистрирующего прибора.

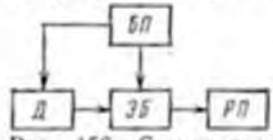


Рис. 156. Структурная схема газоанализатора

2. Для проверки газоанализаторов используются проверочные газовые смеси (ПГС).

3. Для автоматического контроля кислорода в различных технологических процессах широко используются термомагнитные газоанализаторы типа МН, принцип действия которых основан на резко выраженных магнитных свойствах кислорода.

4. Для контроля водорода и других горючих газов нашли применение термокондуктометрические газоанализаторы, использующие их теплопроводные свойства.

5. Газоанализатор (как измерительная система) включает в себя датчик (*Д*), преобразующий необходимую характеристику газа в определенную электрическую величину (сопротивление, ток, напряжение); блок питания (*БП*); электронный блок (*ЭБ*) — для преобразования входной величины в стандартный сигнал, пригодный для регистрации самопишущим прибором; регистрирующий прибор (*РП*), шкала которого выражена в процентах измеряемого газа.

Данные элементы представлены следующей структурной схемой (рис. 156).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой газ обладает в магнитном поле свойством термомагнитной конвекции?

2. Поясните принцип действия магнитных газоанализаторов типа МН (рис. 134). При изъятии магнитной системы над плечевым элементом *R6* (в рабочем мосту *1*) сохранит ли газоанализатор свою работоспособность?

3. Чем отличается конструктивно газоанализатор по теплопроводности типа ТП от магнитного газоанализатора типа МН? По табл. 13 определите, какие газы имеют бо́льшую теплопроводность.

4. Какие газоанализаторы используют для автоматической сигнализации и определения взрывоопасных газов? Сохраняют ли свою работоспособность данные газоанализаторы при неисправностях побудителя расхода?

5. С помощью какого элемента и как определяется наличие расхода газа через газовый тракт газоанализатора (всех типов и конструкций)?

6. Определите, как работает схема сигнализации газоанализатора типа СВК-3М при обрыве, при перегорании чувствительных элементов *R1—R4*.

7. На каком принципе работают оптико-акустические газоанализаторы?

8. Будет ли работать кулонометрический влагомер типа «Байкал» при: отсутствии потока газа через датчик; отсутствии напряжения (70 В) на зажимах датчика; неисправности регулятора расхода; закрытом «байпасе» в газовой схеме?

9. Можно ли настроить газоанализаторы при несоблюдении синфазности питания электроблока и электронного регистрирующего прибора?

10. В чем заключается подготовка газов перед подачей их на газоанализаторы?

После усвоения материала главы и ответа на контрольные вопросы можно приступить к решению задач.

Задача № 13

Термомагнитный газоанализатор типа МН (со шкалой 0—60 %) необходимо проверить на работоспособность при отсутствии поверочных газовых смесей.

Какие существующие в природе газовые компоненты Вы можете предложить для проверки прибора? Будет ли работать данный прибор, если под плечевым элементом (см. рис. 134) убрать постоянное магнитное поле?

Задача № 14

Будет ли достоверно работать газоанализатор СВК-3М, если: 1) плечевые элементы *R1* и *R2* находятся в обрыве (см. рис. 140); 2) поток анализируемого воздуха (контроль по ротаметру) окажется заниженным от паспортного?

ГЛАВА IX
АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

§ 1. Основные понятия и определения

Внедрение автоматизации производства позволяет решить основные экономические задачи — повысить качество выпускаемой продукции и снизить ее себестоимость. Большое значение в автоматизации технологических процессов отводится новой отрасли автоматики — технической кибернетике.

Автоматизацией называется управление и контроль производственного процесса без непосредственного участия технологического персонала. Автоматизация может быть частичная и полная (комплексная). При частичной автоматизации автоматизируются отдельные участки производства и узлы оборудования; при комплексной — автоматизируется весь технологический цикл или процесс, все технологическое оборудование.

В понятие автоматизации включают: автоматическую технологическую сигнализацию отклонений рабочих параметров; автоматическую защиту и блокировку; дистанционное управление и контроль; автоматическое управление и регулирование.

Автоматические системы регулирования (АСР) подразделяются на два вида: замкнутые и разомкнутые.

В замкнутых автоматических системах регулирования (рис. 157, *б*) существует замкнутая связь между объектом и регулятором как по прямому, так и по обратному воздействию (например,

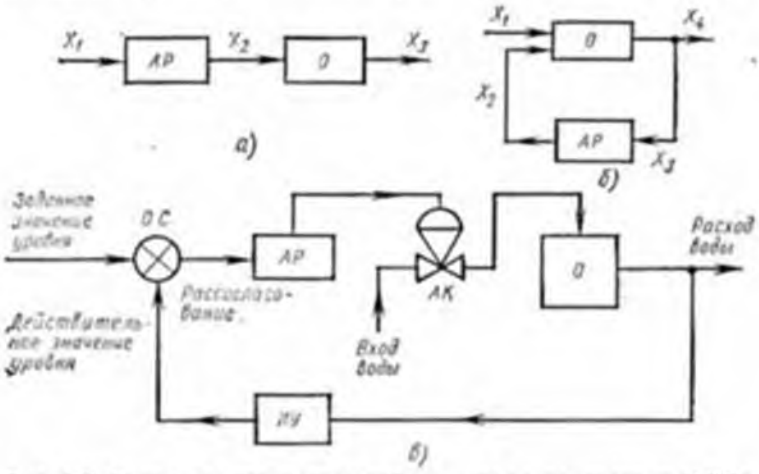


Рис. 157. Структура автоматической системы регулирования (АСР):
а — разомкнутая система: *АР* — автоматический регулятор, *О* — объект, x_1 — входное воздействие, x_2 — внутреннее воздействие, x_3 — выходное воздействие; *б* — замкнутая система: x_1 — входное воздействие, x_2 — управляющее воздействие, x_3 — внутреннее воздействие, x_4 — выходная величина; *в* — структурная схема системы автоматического регулирования: *НУ* — измерительное устройство, *АК* — автоматический клапан, *ОС* — орган сравнения (сумматор)

автоматическое поддержание температуры объекта). В разомкнутых автоматических системах (рис. 157, *а*) между объектом и регулятором существует только прямая связь.

Структура и элементы автоматических систем. Автоматическая система или автоматический регулятор служат для поддержания контролируемой величины на заданном значении. В связи с этим регулятор должен выполнять следующие функции:

измерять контролируемую величину;

сравнивать значение измеренной величины с заданным значением (заданием), определять их рассогласование;

осуществлять регулирование процесса при получении сигнала рассогласования.

В систему регулирования входят следующие основные элементы.

Чувствительный элемент, являясь измерительным органом, предназначается для измерения фактического значе-

ния регулируемой величины и преобразования этой величины в сигнал управления.

Задатчик представляет собой устройство с помощью которого задается требуемое значение регулируемой величины в системе регулирования.

Орган сравнения (сумматор) позволяет сравнить фактическое и заданное значения регулируемой величины.

Усилитель предназначается для усиления сигнала рассогласования органа сравнения.

Исполнительный элемент (механизм) является устройством, с помощью которого регулятор оказывает свое воздействие на регулируемый процесс для поддержания заданного значения контролируемой величины.

Управляющее воздействие представляет собой сигнал определенной величины, сформированный регулятором для управления регулируемым объектом.

Сигнал обратной связи представляет воздействие регулируемого объекта на сам регулятор.

Условные обозначения приборов и элементов автоматики в схемах АСР представлены в табл. 33.

Каждый автоматический регулятор имеет порог чувствительности. Он характеризуется минимальным изменением значения контролируемого параметра, при котором происходит включение регулятора с целью поддержания заданного значения этого параметра.

Вследствие инерционности звеньев регулятора и исполнительного механизма регулятором присуща такая характеристика, как инерционность; она проявляется в отставании времени начала перемещения регулирующего органа (исполнительного механизма) по отношению ко времени отклонения контролируемого параметра от заданного значения. Поэтому инерционность систем автоматического регулирования (САР) ухудшает качество регулирования технологического процесса.

Транспортное запаздывание в САР связано с временем распространения сигнала — транспортировки газов, жидкостей, пульп и других от места отбора до регулятора.

Поэтому такие характеристики САР, как инерционность и транспортное запаздывание, обязательно учитываются при определении устойчивости и качества регулирования.

Объект, в котором поддерживается процесс автоматического управления (регулирования), называется объектом автоматического управления. Например, для автоматической системы регулирования частоты вращения дизель-генератора объектом регулирования является дизель-генератор, а регулируемым параметром — частота вращения вала дизель-генератора.

Автоматическим регулированием называется автоматическое поддержание требуемых значений параметров объекта, осуществляемое методом измерения состояния объекта и воздействия на него регулирующего органа.

Изменения внешних и внутренних факторов, вызывающих откло-

нение регулируемого параметра от заданного значения и нарушающие состояние равновесия объекта, называются возмущающим воздействием или возмущением.

Для нового равновесия САР автоматический регулятор должен отработать регулирующее воздействие, которое прикладывается к объекту.

Кроме того, по виду зависимости между значением регулируемого параметра и значением внешнего воздействия (возмущения) на объект регулирования различают статическое и астатическое регулирование.

При статическом регулировании в установившемся режиме существует определенная зависимость между величиной отклонения регулируемого параметра от заданного значения и величиной воздействующего возмущения. В связи с этим в статических САР наблюдается остаточное отклонение регулируемого параметра от его номинального значения.

При астатическом регулировании в установившемся режиме отклонение регулируемого параметра от заданного значения равно нулю.

Устойчивость и качество регулирования САР. Вследствие различных воздействий, приводящих к отклонению регулируемого параметра от заданного значения, автоматическая система может выходить из состояния равновесия.

Устойчивостью САР называется ее способность восстанавливать состояние равновесия, из которого она выводится под влиянием воздействий.

Основным показателем качества регулирования в установившемся режиме является точность поддержания регулируемого параметра.

В статических системах точность характеризуется величиной отклонения фактического значения регулируемой величины от его заданного значения, т. е. величиной ошибки. Поэтому в статических САР эта ошибка носит название статической ошибки или статизма.

В астатических системах отклонение регулируемого параметра от заданного значения равно нулю, следовательно, статической ошибки не существует.

Динамическая ошибка в САР, т. е. максимальное отклонение регулируемой величины от заданного значения, характеризует качество регулирования в переходном (неустановившемся) процессе.

В ряде случаев при регулировании по возмущению вместо понятия «динамическая ошибка» вводится другой показатель качества регулирования — перерегулирование.

Перерегулирование в САР представляет собой увеличение регулируемой величины от заданного значения при переходном процессе, при скачкообразных входных воздействиях.

Одним из основных свойств объектов регулирования является способность объекта сохранять свою устойчивость без непосредст-

венного участия автоматического регулятора. В связи с этим объекты делятся на устойчивые и неустойчивые.

Объект является устойчивым, если он самостоятельно возвращается в свое первоначальное состояние при отклонении от состояния равновесия под действием возмущающего воздействия.

Если объект не может самостоятельно вернуться в устойчивое положение в результате возмущающего воздействия, то объект называется неустойчивым.

Существуют два основных типа регулирования: регулирование по возмущению; регулирование по отклонению регулируемой величины.

При первом типе регулирования из нескольких возмущений, воспринимаемых объектом, выбирается одно основное, которое, воздействуя на автоматический регулятор, отрабатывает величину управляющего воздействия на исполнительный механизм (клапан, задвижку), достаточную для поддержания заданного значения регулируемой величины.

Например, для автоматической системы поддержания напряжения генератора постоянного тока главным возмущением является изменение частоты вращения его ротора, так как при этом однозначно изменяется и напряжение на генераторе.

При увеличении частоты вращения напряжение возрастает и автоматический регулятор уменьшает ток возбуждения генератора до такой величины, при которой напряжение генератора равно заданному.

Если частота вращения снизилась, то напряжение на генераторе уменьшается. Регулятор напряжения увеличивает возбуждение до такой величины, при котором напряжение генератора равно заданному.

При регулировании по возмущению возможно стабильно поддерживать заданное напряжение при изменении частоты вращения генератора в широком диапазоне.

Такие системы имеют высокую устойчивость и простоту, однако не способны реагировать на другие возмущения.

При втором типе регулирования сравнивается фактическое значение регулируемого параметра с его заданным значением. Если возникает разность этих значений, то автоматическая система формирует регулирующее воздействие.

Для повышения качества регулирования сложных объектов, как правило, используют комбинированные системы автоматического регулирования, состоящие из двух указанных выше типов регуляторов.

Отечественная приборостроительная промышленность выпускает различные типы регуляторов, которые классифицируются по целому ряду признаков (см. табл. 32 и 33):

регуляторы подразделяются на электрические, электронные, пневматические, электропневматические, гидравлические и электрогидравлические;

в зависимости от характера регулирования контролируемой ве-

личины регуляторы делятся на обычные, программные и оптимальные. Программные регуляторы осуществляют регулирование по заданной программе. Экстремальные (оптимальные) регулятор, поддерживают значение контролируемой величины таким образом чтобы сам процесс регулирования являлся наиболее выгодным (оптимальным);

технологические регуляторы подразделяют на регуляторы теплотехнических величин (температура, давление, расход, скорость, уровень и химический состав) и электрических величин (ток, напряжение, частота и т. д.).

На рис. 157, *в* изображена типовая структурная схема системы регулирования.

§ 2. Типовые звенья системы автоматического регулирования

Все системы автоматического регулирования представляют собой совокупность целого ряда типовых устройств — исполнительных механизмов, двигателей, сервоприводов, редукторов, усилителей, механических и электрических контуров и т. п.

Все эти устройства могут представляться рядом типовых звеньев — безынерционных, инерционных (апериодических), интегрирующих, дифференцирующих и колебательных, которые имеют определенные динамические характеристики. Поэтому общая характеристика автоматической системы регулирования складывается из характеристик составных элементов — звеньев.

Динамическая характеристика звена определяет зависимость выходной величины $U_{вых}$ от входной величины $U_{вх}$; $U_{вых}=f(U_{вх}, t)$, где t — время.

Безынерционным (пропорциональным) звеном называется звено, у которого выходная величина $x_{вых}$ пропорциональна изменениям входной величины $x_{вх}$; $x_{вых}=kx_{вх}$, где k — коэффициент усиления (передаточное число звена). Характерной особенностью такого звена является его безынерционность, т. е. отсутствие запаздывания выходного сигнала при скачкообразном изменении входного сигнала.

На рис. 158, *а* показана характеристика безынерционного звена.

Апериодическим звеном называется звено, в котором при скачкообразном изменении входной величины выходная величина измеряется по экспоненциальному закону.

Инерционное звено (рис. 158, *б*) состоит из резистора R и емкости C. Напряжение на входе и выходе схемы связано уравнением $U_{вх}=U_{вых}+U_R=U_{вых}+IR$, где U_R — падение напряжения на резисторе R.

Напряжение на конденсаторе $U_{вых}$ зависит от величины тока, проходящего через конденсатор C, и величины сопротивления R. Для инерционного звена основной характеристикой является постоянная времени T, которая отражает экспоненциальный закон изменения выходной величины $U_{вых}$.

Постоянная времени T определяется произведением величин емкости C и сопротивления звена R; $T=RC$. Апериодическое звено иногда называют инерционным, одноемкостным или статическим.

Дифференцирующим звеном называется звено, в котором выходная величина изменяется пропорционально скорости

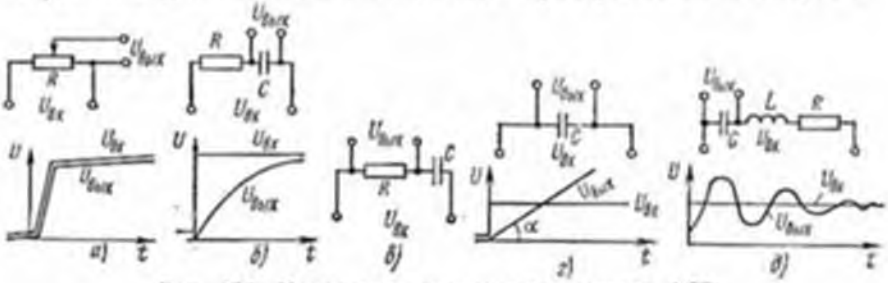


Рис. 158. Характеристики типовых звеньев АСР:

а — безынерционное звено, *б* — инерционное звено, *в* — дифференцирующее звено, *г* — интегрирующее звено, *д* — колебательное звено; $U_{вх}$ — напряжение входа, $U_{вых}$ — напряжение выхода, R — сопротивление, C — емкость, L — индуктивность

изменения входной величины. На рис. 158, *в* показана схема дифференцирующего звена. Для электрической цепи, состоящей из конденсатора и резистора, можно записать уравнение $U_{вх}=U_C+U_R=U_C+U_{вых}$.

Из уравнения видно, что напряжение на входе схемы равно сумме напряжений на выходе схемы и на конденсаторе. Выходное напряжение имеет вид убывающей экспоненты при скачкообразном изменении входного напряжения $U_{вх}$. Примером дифференцирующего звена является электрическая цепь, состоящая из резистора и емкости (или индуктивности).

Интегрирующим звеном называется звено, в котором скорость изменения выходной величины пропорциональна изменению входной величины. Интегрирующими звеньями (рис. 158, *г*) являются емкость, электродвигатель, золотниковый механизм и т. д. Основным параметром такого звена является тангенс угла наклона временной характеристики $\operatorname{tg}\alpha$, который характеризует скорость изменения выходной величины.

Колебательным звеном называется звено, в котором при скачкообразном изменении входной величины выходная величина принимает установившееся новое значение после ряда затухающих колебаний. К таким звеньям можно отнести колебательные электрические и механические контуры.

На рис. 158, *д* показана схема колебательного звена и его временная характеристика.

§ 3. Законы регулирования

Существуют пять основных законов регулирования: позиционный — Т, пропорциональный — П, интегральный И, пропорционально-интегральный — ПИ, пропорционально-интегрально-дифференциальный — ПИД.

Позиционное регулирование (рис. 159, *а*) производится по принципу «открыть — закрыть» и подобно работе релейных элементов. Такая система регулирования является простейшей и характеризуется автоколебательным переходным процессом.

Режим автоколебаний в САР проявляется при неустойчивых переходных процессах, когда амплитуда и частота колебаний постоянны.

Примером позиционной системы регулирования является регулирование уровня воды в рабочей емкости с помощью поплавкового

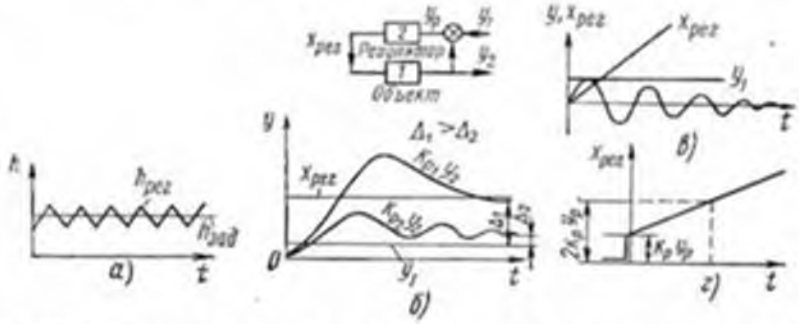


Рис. 159. Переходные процессы регулирования при различных законах регулирования:

а — позиционный, *б* — пропорциональный, *в* — интегральный, *г* — пропорционально-интегральный

реле типа РУС, чувствительным элементом которого является сильфон.

Если контролируемый уровень ниже заданного, реле РУС замыкает свой исполнительный контакт в цепи электродвигателя насоса, пополняющего уровень воды. При достижении заданного уровня реле размыкает свой контакт в цепи управления электродвигателя и насос прекращает подпитку водой.

Пропорциональный закон (рис. 159, *б*) позволяет изменять положение регулирующего органа пропорционально отклонению регулируемой величины от заданного значения: $x_{рег} = K_p(y_1 - y_2) = K_p y_p$, где K_p — коэффициент усиления регулятора, y_1 — задание регулируемой величины, y_2 — истинное значение регулируемой величины, y_p — рассогласование.

Для характеристики переходного процесса регулирования большое значение имеет величина коэффициента усиления K_p.

Для пропорционального закона регулирования характерна статическая ошибка регулирования Δ, связанная с самим принципом регулирования — изменением положения регулирующего органа только при отклонении регулируемого параметра от заданной величины. При увеличении коэффициента K_p уменьшается Δ, а при K_p больше некоторых величин переходной процесс регулирования может носить колебательный характер.

Несмотря на статическую ошибку регулирования, П-регуляторы широко применяются в системах автоматического регулирования.

Интегральный закон (рис. 159, *в*) позволяет изменять скорость перемещения регулирующего органа пропорционально отклонению регулируемой величины от заданного значения. И-регуляторы обеспечивают устойчивую работу только на объектах с самовыравниванием, при этом переходный процесс регулирования имеет вид затухающих периодических колебаний. Из графика видно, что И-регулятор позволяет осуществлять регулирование без статической ошибки при установившемся процессе.

Пропорционально-интегральный закон (рис. 159, *г*) позволяет изменять как величину, так и скорость перемещения регулирующего органа пропорционально отклонению регулируемой величины от заданного значения. ПИ-регулятор, включая в себя пропорциональный и интегральный законы регулирования, очень часто может обеспечивать высокое качество регулирования, исключающее статическую и уменьшающее динамическую ошибки системы.

ПИ-регулятор используется на объектах с самовыравниванием и без самовыравнивания.

При $K_p=0$ регулятор работает по И-закону, при $T_{из}=\infty$ регулятор переходит на П-регулирование.

Время изодрома $T_{из}$ — это время, за которое происходит удвоенное приращение пропорциональной составляющей за счет интегральной составляющей регулятора. Время изодрома является одной из основных характеристик ПИ-регулятора.

Выходной сигнал регулятора $x_{рег}$ показан на рис. 159, *г* при скачкообразном входном сигнале.

На рис. 159 показаны кривые, характеризующие качество регулирования различных типов регуляторов на одном и том же объекте при одинаковых возмущающих воздействиях.

Из графиков видно, что П- и И-регуляторы имеют ряд недостатков. Например, П-регулятор при достаточно большом быстродействии допускает неравномерность. И-регулятор, не допуская неравномерности, приводит к значительному начальному перерегулированию и увеличению времени регулирования.

Характеристики ПИ- и ПИД-регуляторов наиболее полно отвечают основным требованиям регулирования: малому значению начального перерегулирования; малому значению статической ошибки регулирования.

§ 4. Пневматические регуляторы

Пневматические регуляторы имеют относительную простоту элементов, датчиков, усилителей и преобразователей; высокую надежность и компактность конструкции; возможность использования в пожаро- и взрывоопасных производствах. Все это создало предпосылки к созданию целого ряда типовых систем пневмоавтоматики, среди которых основными являются системы АУС и УСЭППА.

Самопишущие приборы с пневматическим изодромным регулирующим устройством широко применяют для автоматического регулирования температуры, давления, уровня и расхода.

Пневматический регулятор МТ-711р показан на рис. 160, *а*. Регулятор имеет три штуцера *3*; «Вход», «Выход» и «Питание». На «Вход» подключается контролируемое (регулируемое) давление, через штуцер «Питание» осуществляется питание прибора

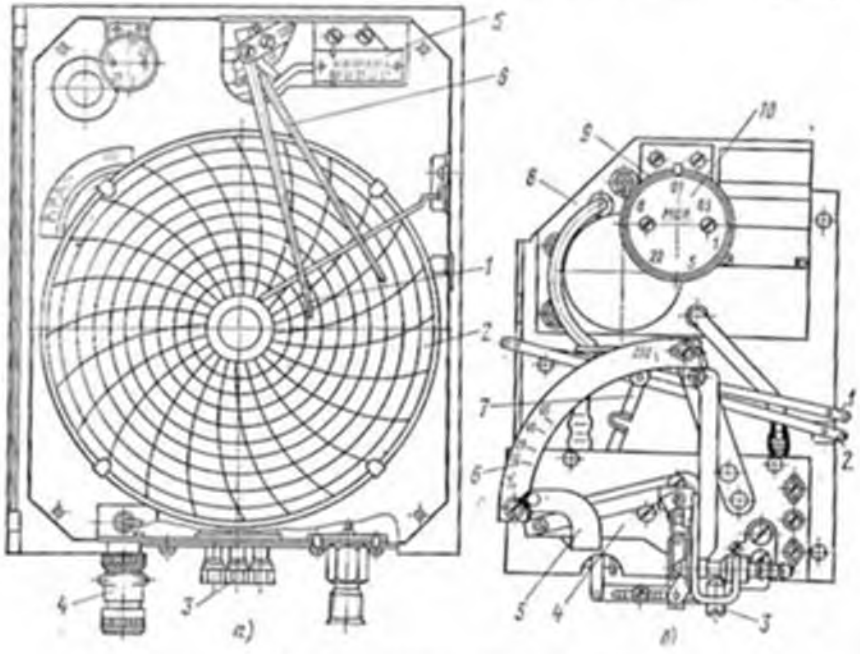


Рис. 160. Пневматический регулятор МТ-711р:
а — устройство: *1* — перо, *2* — диаграмма, *3* — штуцера, *4* — разъем, *5* — двухстрелочный манометр, *6* — стрелка задания, *б* — регулирующее устройство регулятора: *1, 2* — рычаги, *3* — регулировочный винт, *4* — регулирующий блок, *5* — поводок пропорциональности, *6* — шкала, *7* — тяга, *8* — интегральный блок, *9* — кольцо, *10* — шкала времени изодрома

сжатым воздухом 140 кПа (1,4 кгс/см²), а на «Выход» подсоединяется линия питания сжатым воздухом пневматического исполнительного механизма. Стрелка с пером *1* связана с измерительным механизмом прибора и служит для автоматической записи контролируемого параметра на диаграмме *2*; стрелка *6* является установочной стрелкой «Задания» регулирования. При отклонении контролируемого давления от задания регулирующее устройство формирует пневматический сигнал в пределах 20—100 кПа (0,2—1,0 кгс/см²) и через штуцер «Выход» воздействует на мембрану исполнительного механизма. При этом механизм закрывает или открывает рабочее сечение до тех пор, пока регулируемое давление не станет равно давлению «Задания».

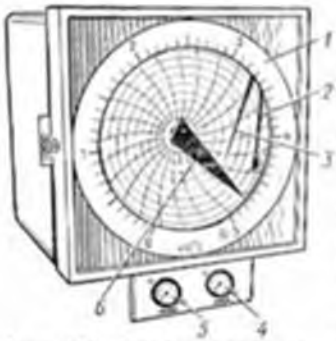


Рис. 161. Прибор с пневмовыходом типа КСЗ:
1 — шкала, *2* — перо, *3* — задатчик, *4* — манометр на выходе, *5* — манометр на входе, *6* — стрелка

В верхней части прибора установлен двухстрелочный манометр *5*, по верхней шкале которого контролируется давление питания прибора, по нижней — давление на выходе пневмоусилителя, т. е. выходной сигнал.

На рис. 160, *б* показано регулирующее устройство прибора. При изменении давления на входе прибора через рычаг *2* на вход регулирующего устройства подается сигнал, пропорциональный отношению давления к давлению «Задания», который затем формируется в выходной сигнал прибора.

Время изодрома $T_{из}$ устанавливается перемещением кольца *9* относительно шкалы *10*. При времени изодрома $T_{из}=\infty$ происходит полное закрытие дросселя регулирующего устройства и прибор работает как П-регулятор.

При изменении $T_{из}$ в пределах 0,1—20 мин можно получать различные статические характеристики регулятора.

Шкала *6* служит для изменения предела пропорциональности регулирования в пределах 10—250%.

Приборы серии КСЗ, представленные на рис. 161, с пневматическим изодромным регулирующим устройством подобны пневматическим регуляторам МТ-711р.

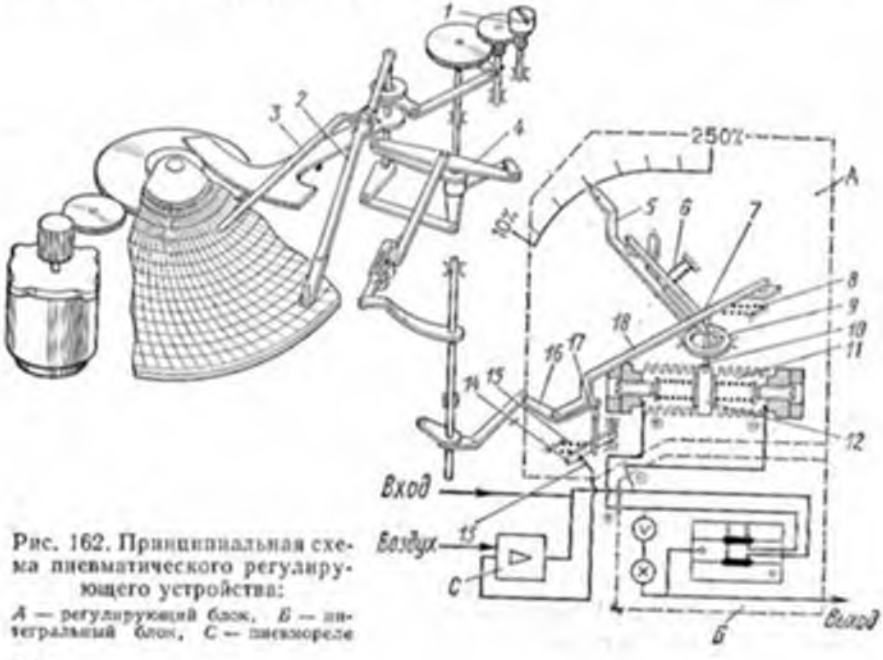


Рис. 162. Принципиальная схема пневматического регулирующего устройства:
А — регулирующий блок, *Б* — интегральный блок, *С* — пневмореле

Принципиальная схема изодромного регулятора, использованного в приборах КСЗ, приведена на рис. 162.

Значение регулируемого параметра задается ручкой *1* «Установка задания», расположенной на передней панели прибора, при вращении которой происходит перемещение указателя задания *3* относительно диаграммы.

Если значение регулируемого параметра совпадает со значением выставленного задания (перо *2* и указатель *3* совмещены), то давление в линии пневматического исполнительного механизма соответствует нормальному течению процесса. При рассогласовании между параметром и заданием положение средней точки коромысла *4* изменяется, что приводит к появлению входного сигнала регулятора. Входным сигналом регулятора является перемещение свободного конца углового рычага *16* регулирующего блока.

Регулятор может работать по пропорциональному П или пропорционально-интегральному ПИ закону регулирования.

Работа П-регулятора заключается в следующем. При подаче на вход регулирующего блока входного сигнала угловой рычаг *16* поворачивается на оси и штифт *17* отходит от заслонки *14*. Под действием пружины *15* заслонка приближается к соплу *13* и закрывает его отверстие. При этом в пневмореле возрастает давление, которое передается в сильфон отрицательной обратной связи *11*, в результате чего перегородка *12* перемещается, и штифт *10*, скользя вдоль поверхности рычага *9*, поворачивает его под действием пружины *6*.

При повороте рычага *9* штифт *7* отходит от поверхности рычага *18*, который под действием пружины *8* поворачивается по часовой стрелке и перемещает угловой рычаг *17* в направлении, противоположном тому, в котором произошло перемещение штифта *17* при подаче сигнала на выход. Штифт *17* приближается к заслонке и отводит ее от сопла на некоторое расстояние, соответствующее давлению на выходе (т. е. в сильфоне отрицательной обратной связи).

Коэффициент пропорциональности регулирования настраивается поворотом рычага *5* вокруг оси, проходящей через штифты *7* и *10*.

Величина предела пропорциональности определяется выраженным в процентах отношением величины перемещения пера (стрелки задания), вызывающего изменение давления на выходе прибора к величине всего поля диаграммы.

Например, при установке минимального предела пропорциональности (10%) перемещение пера по диаграмме относительно стрелки задания на 1% вызовет изменение давления на выходе на 10% от его рабочего диапазона. При этом пневматический исполнительный механизм (регулирующая задвижка), на который подается сигнал от регулятора, переместится на 10% своего полного хода.

При установке максимального предела пропорциональности (250%) то же перемещение пера вызовет изменение положения регулирующего органа (задвижки) только на 1/250 своего полного хода.

Агрегатная унифицированная система (АУС) состоит из стандартных блоков, которые выполняют самостоятельные функции. Входные и выходные параметры блоков представляют собой давления сжатого воздуха, изменяющиеся в определенном диапазоне. Блоки системы АУС подразделяют на регулирующие, регистрирующие, измерительные и вспомогательные, которые могут использоваться также в сочетании с электрическими приборами (с помощью электрических и электропневматических преобразователей). Приборы работают под давлением воздуха 140 кПа (1,4 кгс/см²), а диапазон давления с выхода блоков составляет 20—100 кПа (0,2—1 кгс/см²). В этом диапазоне работают все мембранные исполнительные механизмы.

Основным блоком системы является регулирующий блок ПР3.6 с дистанционным заданием. В блок входят усилительное реле, элементы сравнения, обратной связи, изодрома и отключающее реле.

На рис. 163 показана принципиальная схема регулирующего блока ПР3.6. Давление питания, равное 140 кПа (1,4 кгс/см²), поступает через канал *1* в камеру *А* и через сужающие устройства — дроссели $Др_1$ и $Др_2$ — в камеры *Г* и *И*. Выходное отверстие камеры

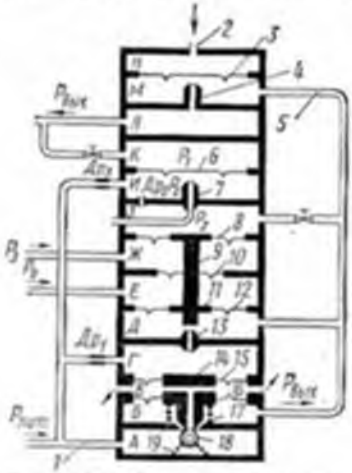


Рис. 163. Схема регулирующего блока ПР3.6:

1, 2, 3 — каналы, 3, 6, 8, 10, 12, 15, 16 — мембраны, 4, 7, 13 — сопла, 9 — шток, 11, 14, 17 — заслонки, 18 — шариковый клапан, 19 — пружина

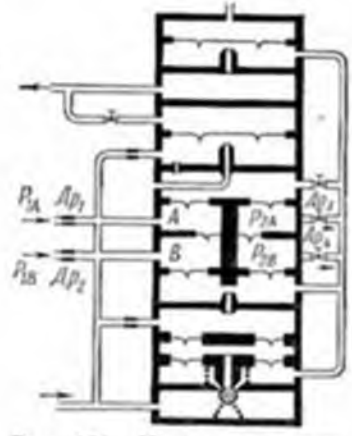


Рис. 164. Изодромный регулятор соотношения типа РБС-1

А прикрывается шариковым клапаном *18* с пружиной *19*. Камера *Е* является камерой измерения. В камеру подается давление P_2 от пневмодатчика, величина которого пропорциональна величине регулируемого параметра. Камера *Ж* является камерой задания, в нее поступает давление воздуха P_3 от задатчика. Между камерами *З* и *Д* расположен трехмембранный блок, образующий между мембранами *8*, *10*, *12* камеры *Ж* и *Е*.

Давление в камере задания *Ж* меняется только при перестановке задания, а в камере измерения *Е* — при изменении величины регулируемого параметра. Так как площади мембран равновелики, то при равенстве давлений в камерах *Ж* и *Е* ход штока *9* определяется только соотношением давления задания и давления измерения в камерах *Ж* и *Е*. Давление в камере *Д* является отрицательной обратной связью, а давление в камере *З* — положительной обратной связью.

При изменении соотношения давлений $P_в$ и $P_з$ изменяется положение узла «сопло — заслонка», что вызывает изменение выходного давления $P_{вых}$ от 20 до 100 кПа (0,2—1 кгс/см²), поэтому трехмембранный блок, образованный камерами *Е* и *Ж*, называется элементом сравнения.

В силу своей конструкции камеры *А*, *Б*, *В* и *Г* представляют собой усилитель мощности, необходимый для преобразования выходного сигнала реле в усилие, пригодное для управления мембранным исполнительным механизмом.

Камеры *Н*, *М* и *Л* являются отключающим реле и используются для перевода управления регулируемого объекта в ручной или автоматический режим. При переводе в ручное управление через канал *2* в камеру *Н* подается давление питания, под действием которого мембрана *3* деформируется и прикрывает сопло *4*, прекращая подачу выходного давления $P_{вых}$ из канала *5* в камеру *М*, т. е. происходит отключение регулятора.

Изодромный регулятор соотношения типа РБС-1 (рис. 164) отличается от регуляторов типа РБ проточной конструкцией камеры измерения *А* и камеры задания *В*. Давление от датчиков, измеряющих контролируемые параметры, соотношения которых требуется поддерживать постоянными, подается на эти камеры через постоянные дроссели $Др_1$ и $Др_2$. С помощью регулируемых дросселей $Др_3$ и $Др_4$ обеспечивается настройка на заданную величину соотношения.

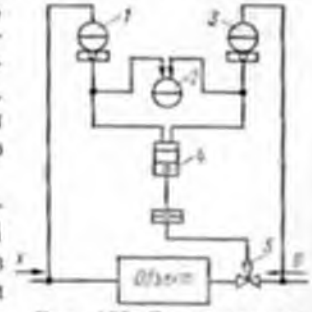


Рис. 165. Схема регулирования соотношения двух параметров с помощью регулятора типа РБС-1

Регулятор обеспечивает постоянное заданное соотношение параметров камер *А* и *В*, так как входное давление датчиков $P_{1А}$ и $P_{1В}$ пропорционально измеряемым параметрам.

На рис. 165 представлена схема регулирования соотношения двух параметров с помощью регулятора типа РБС-1. Параметр *x* является основным, *y* — ведомым. Давление от датчиков *1* и *3*, пропорциональное параметрам *x* и *y*, поступает на регистрирующий прибор *2* и на регулятор соотношения *4*, обеспечивающий соотношение параметров: $K = x/y$.

При изменении соотношения изменяется давление выходного сигнала регулятора и пневмосигнал управляет регулирующим пневматическим механизмом *5*, открывая или закрывая его проходное

сечение, с тем чтобы обеспечить заданное соотношение параметров.

Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики УСЭППА включает в себя набор унифицированных элементов дискретного и непрерывного действия. Такие элементы компонуются, подобно электронным схемам на печатных платах, и состоят из пневмоусилителей и пневмореле. Отличительной особенностью от системы АУС является наличие пневмосопротивлений, пневмоемкостей и целого ряда других аналогов электрических и электронных элементов. Поэтому из таких элементов могут быть построены любые приборы-регуляторы с широкими диапазонами настроек, которые являются аналогами электрических и электронных регуляторов.

В настоящее время выпускается 37 различных элементов, выполненных на платах из органического стекла, склеенного из трех плоских пластин. В средней плате с двух сторон фрезеруют каналы. Связь между элементами обеспечивается через отверстие в ножках плат с помощью резиновых трубок. Давление питания приборов 140 кПа (1,4 кгс/см²), диапазон изменения выходного сигнала 20—100 кПа (0,2—1,0 кгс/см²). В качестве дискретных сигналов принято давление 0 и 140 кПа (1,4 кгс/см²), т. е. отсутствию давления соответствует условно «0», а полному давлению 140 кПа — условно «1».

В качестве примера элемента дискретной техники на рис. 166 показано устройство и принцип действия трехмембранного реле, формирующего на выходе дискретные пневмосигналы «0» и «1».

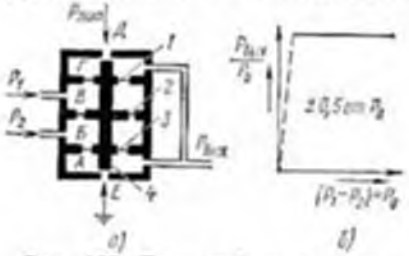


Рис. 166. Трехмембранное реле:
а — схема, б — характеристика

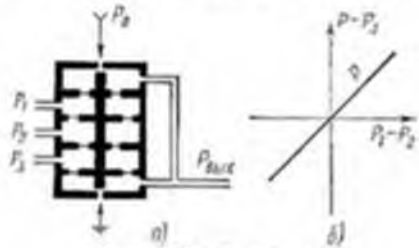


Рис. 167. Сумматор:
а — схема, б — характеристика

Реле имеет четыре камеры *А*, *Б*, *В*, *Г*, разделенные мембранами *1*, *2*, *3*, находящимися на металлическом штоке *4*. Верхний конец штока является заслонкой питающего сопла *Д*, нижний — заслонкой сбросного сопла *Е*. Шток *4* в зависимости от соотношения давлений в камерах может перемещаться вверх или вниз, открывая одно из сопл и закрывая другое.

При прикрытии верхнего питающего сопла *А* и открытии нижнего сбросного сопла *Б* давление $P_{вых}$ (давление на выходе) уменьшится.

При обратном перемещении штока *4* $P_{вых}$ увеличивается.

Следовательно, данное реле формирует выходной сигнал давления «0» или «1» в зависимости от соотношения значений входных давлений P_1 и P_2.

Реле имеет шесть выводов и в зависимости от схемы включения может выполнять функцию логических элементов ДА, НЕТ, И, ИЛИ, ЗАПРЕТ.

Сумматор (рис. 167) имеет коэффициент усиления, равный единице, и выполняет операцию суммирования входных сигналов: $P=P_1+P_2+P_3$.

Регуляторы системы «Старт», построенные на элементах УСЭППА, включают пневматические приборы-регуляторы, автоматические оптимизаторы и вычислительные устройства.

Основными типами пневматических регуляторов, используемых в автоматизации технологических процессов производства, являются: пропорциональный регулятор ПР2.5, пропорционально-интегральный регулятор ПР3.21, регулятор соотношения ПР3.23, ПР3.24, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор ПР3.25.

Питание регуляторов осуществляется воздухом давлением 140±14 кПа (1,4±0,14 кгс/см²).

При рассогласовании давления задания и контролируемого давления регулятор формирует соответствующий выходной пневматический сигнал от 20 до 100 кПа (0,2—1,0 кгс/см²), который используется для регулирования степени открытия (закрытия) пневмати-

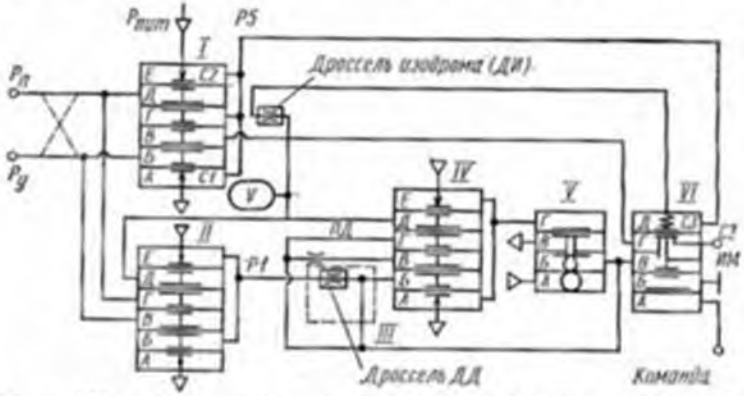


Рис. 168. Схема пропорционально-интегрального регулятора ПР3.21:

I, II, IV — элементы сравнения, *III* — сумматор, *V* — усилитель мощности, *VI* — включающее реле

ческого исполнительного механизма (задвижки) с целью поддержания контролируемого параметра в заданном режиме. На рис. 168 представлена схема пропорционально-интегрального регулятора ПР3.21.

Схема регулятора включает три пятимембранных элемента сравнения *I*, *II*, *IV*, усилитель мощности *V*, сумматор *III* и выключающее реле *VI*.

Принцип работы пятимембранных элементов сравнения *I*, *II*, *IV*: камеры *A*, *E* имеют сопло — заслонку, давление питания по-

дается в камеру *Е*, а камера *А* через сопло связана с атмосферой. При перемещении вниз жесткого стержня, соединяющего мембраны, в камере *Е* увеличивается расстояние сопло — заслонка, а в камере *А* сопло прикрывает заслонку. Поэтому происходит перераспределение потоков: в выходной линии давление повышается.

С выхода элемента сравнения *IV* сигнал поступает на вход усилителя мощности в камеру *Г*. Чем больше давление входного сигнала, тем более прогибается вниз мембрана в камере *Г*, надавливая соплом на малый шарик в камере *Б*, который перемещает большой шариковый клапан в камере *А*, открывая путь воздуху из камеры *А* в камеру *Б*, а затем на выключающее реле.

Усиление сигнала по мощности на элементе *V* выполняется за счет того, что в импульсную линию и выключающее реле поступает воздуха значительно больше, чем от элемента сравнения *IV*.

Элемент *I* регулятора выполняет интегральную часть, а элемент *II* — пропорциональную часть регулятора.

Регулятор может работать как пропорциональный при отключении блока *I*. Для этого необходимо полностью закрыть дроссель изодрома *ДИ*, с тем чтобы воздух от элемента *I* камеры *Е*, проходя через выключающее реле *VI* (сопло *С3*), не попадал через дроссель *ДИ* на элемент *IV*.

Для устранения автоколебаний на выходе прибора в цепь положительной обратной связи (камеры *В* элемента *IV*) установлен постоянный дроссель *ПД*.

Статизм, т. е. коэффициент пропорциональности П-регулятора, регулируется с помощью дросселя *ДД*.

При использовании ПР3.21 как пропорционально-интегральный регулятор необходимо открыть дроссель *ДИ*. Емкость *V* используется для создания необходимого времени задержки — в р е м е н и и з о д р о м а (от 3 с до 100 мин).

В регуляторе отсутствует ручной задатчик для установки начального значения сигнала выхода.

Непосредственное суммирование выходных сигналов пропорциональной и интегральной частей регулятора производится в пропорциональной части.

В камеру *Д* элемента сравнения *I* подключается давление $P_{\text{п}}$ от датчика, а в камеру *Б* — давление от задатчика, который установлен во вторичном регистрирующем приборе.

При возрастании давления от датчика $P_{\text{п}}$ мембранная сборка элемента *I* перемещается вниз и давление $P_{\text{з}}$ на выходе элемента возрастает, при этом давление после дросселя изодрома *ДИ* нарастает медленнее, так как скорость нарастания этого давления зависит как от степени открытия самого дросселя, так и рабочего объема емкости *V*.

В элементах *I* и *II* давление в камерах *Д* изменяется от рассогласования интегральной части на входе регулятора. Это изменение давления вызывает дополнительное изменение сигнала на выходах элементов *I*, *II*.

Давление на выходе регулятора, поступающее на управление исполнительным механизмом, суммируется от пропорциональной и интегральной составляющих.

Гидравлическая система автоматики СЭГРА, подобно системе УСЭППА, позволяет на базе своих элементов создавать все типы регуляторов: пропорциональные — П, интегральные — И, пропорционально-интегральные — ПИ и пропорционально-интегральные с предварением — ПИД.

Рабочей жидкостью для элементов СЭГРА является веретенное масло.

Регуляторы системы «Старт» и регулирующие блоки АУС используют совместно с вторичными пневматическими показывающими или самопишущими приборами, которые записывают (или показывают) на диаграммной бумаге значение регулируемого параметра и сигнала управления.

Вторичные приборы системы АУС выполняют по схеме прямого измерения, поэтому имеют сравнительно невысокий класс точности, равный единице.

На рис. 169 представлена принципиальная схема вторичного пневматического прибора типов ПВ-4, ПКР системы «Старт».

Прибор имеет три измерительных механизма, чувствительными элементами (датчиками) которых являются сильфоны *5*. При подаче на сильфон пневмосигнала в нем появляется усилие, величина которого пропорциональна входному давлению воздуха. Это усилие вызывает пропорциональную деформацию (перемещение) сильфона, которая уравновешивается силой упругой деформации пружины *4*.

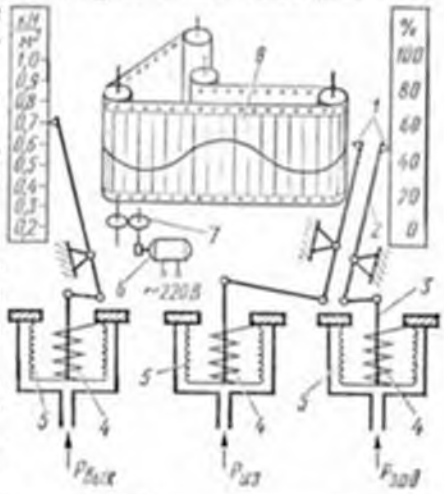


Рис. 169. Принципиальная схема регистрирующего прибора типов ПВ-4, ПКР

Вследствие деформации сильфона *5* тяга *3* повторяет его колебания и через шарнирно-рычажный механизм *2* с помощью пера *1* наносит на диаграммной бумаге *8* изменение значения измеряемой величины во времени.

Для привода лентопротяжного механизма установлен синхронный электрический двигатель *6* с редуктором *7*. Для изменения скорости привода диаграммы в пределах 20—120 мм/ч необходимо изменить расположение сменных шестеренок на приводе (согласно приложенной заводской кинематической схемы).

Для устранения дополнительной погрешности измерений из-за изменения окружающей температуры прибор имеет температурный компенсатор.

На лицевой части прибора имеется переключатель режима работы: «Автоматическое», «Ручное», «Промежуточное». Данный пневматический переключатель связан с регулятором, задатчиком прибора, датчиком, линией пневмопитания и пневматическим исполнительным механизмом (задвижкой).

Вторичные пневматические регистрирующие приборы системы «Старт» подобны приборам системы АУС, однако по принципу действия основаны на компенсационном методе, вследствие чего имеют сравнительно высокую чувствительность.

Типы регистрирующих приборов системы «Старт»: ПВ4.2 — для записи и показаний одного параметра, ПВ4.3 — для записи и показаний двух параметров, ПВ10.1 — для записи и показания величины регулируемого параметра и значения пневмосигнала на исполнительном механизме (задвижки).

Привод диаграммы может осуществляться пневмоприводом П или электроприводом Э. Прибор с пневмоприводом имеет маркировку ПВ4.2П, с электроприводом — ПВ4.2Э.

Типы показывающих приборов системы «Старт»: ПВ1.1 — для показаний одного параметра, ПВ1.2 — для показаний двух параметров, ПВ1.3 — для показаний трех параметров.

§ 5. Электронные регуляторы

В настоящее время отечественная промышленность располагает различными типами автоматических электронных регуляторов и систем регулирования для контроля от одного до нескольких десятков технологических параметров.

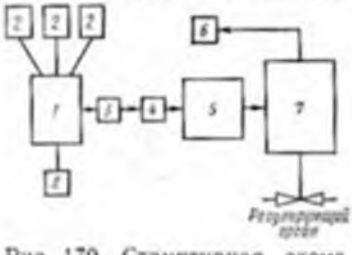


Рис. 170. Структурная схема регулирования с помощью электронного регулятора:
1 — регулятор, *2* — датчики, *3* — переключатель, *4* — ключ управления, *5* — пусковое устройство, *6* — указатель положения привода, *7* — исполнительный механизм, *8* — задатчик

Структурная схема работы электронных регуляторов представлена на рис. 170.

Основными элементами электронного регулятора Р-25 (рис. 171) являются: измерительный датчик (температуры, давления, расхода и т. д.), установленный на объекте; измерительная схема и регулирующий блок.

Назначение и устройство различных измерительных датчиков рассмотрены в гл. IV, V, VI, а работа регулирующего блока подобна работе выходного каскада электронного автоматического прибора типа КСП (см. гл. IV § 4). Поэтому рассмотрим только схему измерительного блока регулятора Р-25 (рис. 172). Контроль и регулирование двух точек температуры осуществляется с помощью датчиков — термометров сопротивления ТС-1 и ТС-2. Датчики устанавливают на объекте и подключают (с помощью кабельной связи) на зажимы *12—11* и *12—13* регулятора соответственно. Регулятор Р-25 устанавливают в щитовом или диспетчерском пульте.

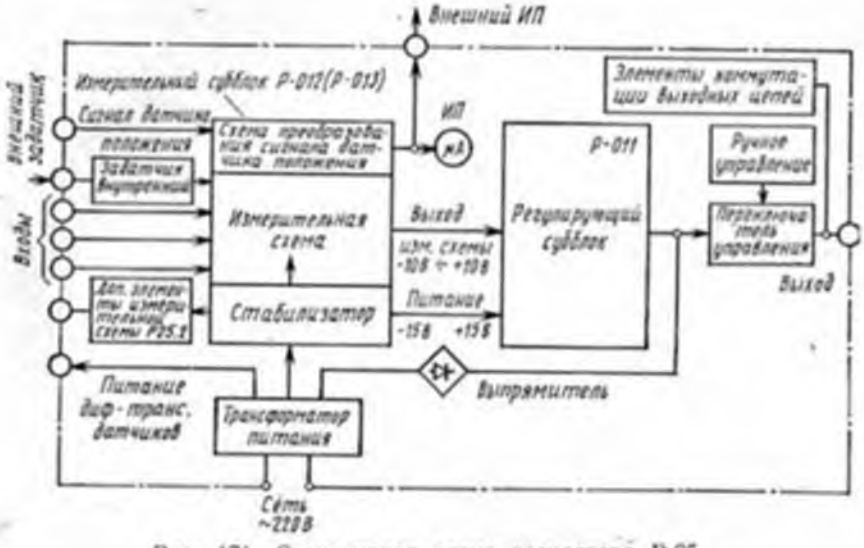


Рис. 171. Структурная схема регулятора Р-25

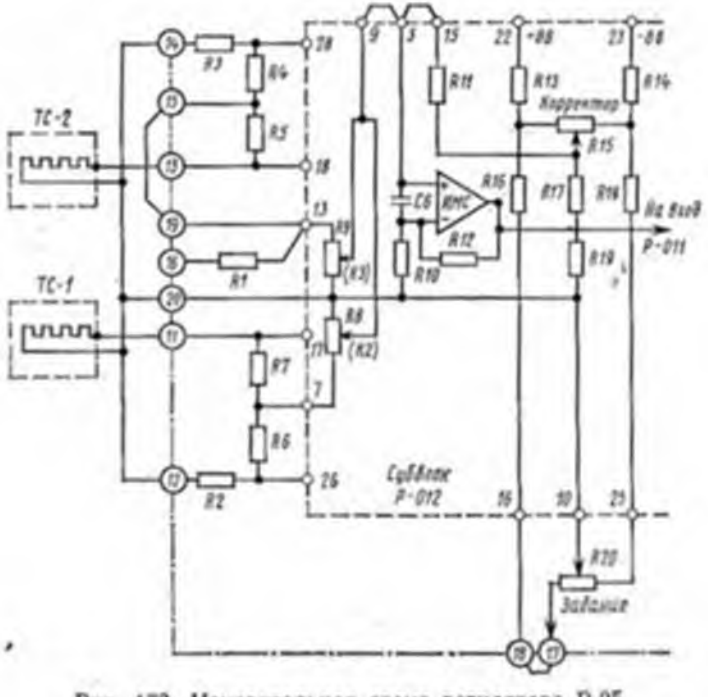


Рис. 172. Измерительная схема регулятора Р-25

Измерительный субблок Р-012 (кроме подключенных датчиков ТС-1, ТС-2) имеет два переменных сопротивления — задатчик ($R20 = R_{зад}$) и корректор ($R15 = R_{кор}$). Если упростить измерительную схему регулятора Р-25, то получим электрическую схему двух измерительных мостов, состоящих из определенных сопротивлений (рис. 173).

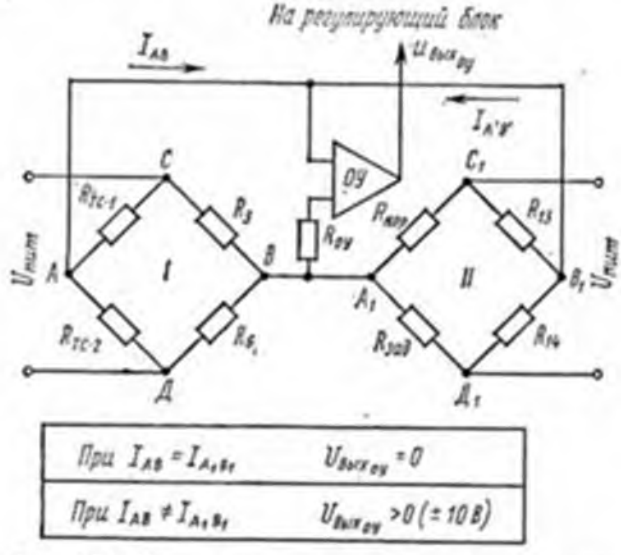


Рис. 173. Упрощенная измерительная схема регулятора Р-25:

I — первый мост (с переменными параметрами), *II* — второй мост (с постоянными параметрами), *ОУ* — операционный усилитель

Выход двух мостовых схем включен на операционный усилитель *ОУ*, представляющий собой интегральную микросхему, реализующую усиление входного электрического сигнала. Если сопротивления в плечах двух мостов будут равны друг другу, то и токи в их измерительных диагоналях *AB* и *A'B'* равны нулю. Поэтому отсутствует сигнал (напряжение) на входе операционного усилителя, а стало быть нет сигнала (напряжения) и на его выходе.

Конструктивно номиналы сопротивлений, составляющих мосты, при установке регулятора на объекте подбираются так, чтобы при заданном значении параметра мосты находились в состоянии равновесия — сбалансированы.

Например, требуется поддерживать температуру электрического нагревателя в диапазоне 200±2 °С. Определив по табл. 4 значение сопротивления датчиков ТС-1 ТС-2 при данной температуре, устанавливают сопротивление задатчика $R_{зад}$, равное данному значению, а резистором $R_{кор}$ (корректором) обеспечивают балансирование схемы, т. е. отсутствие сигнала на выходе операционного усилителя при температуре 200 °С.

Так как сопротивление во втором (сравнительном) мосте постоян-

и, то и ток в измерительной диагонали постоянный; этот мост образован сопротивлениями $R_{кор} - R_{зад} - R_{13} - R_{14}$.

В первом мосте сопротивления датчиков ТС-1 и ТС-2 являются переменными и зависят только от измеряемой температуры: если температура на объекте равна заданной, то все сопротивления моста $R_{ТС-1} - R_{ТС-2} - R_3 - R_4$ равны друг другу и ток в измерительной диагонали равен нулю.

Если температура объекта отличается от заданной (200 °С), то изменяется сопротивление датчиков ТС-1 и ТС-2 (в зависимости от температуры их сопротивление становится больше или меньше сопротивления задания). Вследствие этого нарушается равновесие двух измерительных мостов, а на входе операционного усилителя *ОУ* появляется напряжение определенной полярности (+ или —), значение которого зависит от степени рассогласования задающей и действительной температуры объекта измерения. Это напряжение принято называть напряжением рассогласования. Сопротивления $R6\,(K_2)$ и $R3\,(K_2)$ позволяют изменять напряжения на датчиках-термометрах ТС-1 и ТС-2 с коэффициентом K от 0 до 1.

В зависимости от полярности входного сигнала на входе операционного усилителя *ОУ* в регулирующем блоке (на рисунке не показан) с помощью ряда операционных усилителей выполняется команда «прибавить» или «убавить», т. е. включается или выключается электрический подогреватель, с тем чтобы поддержать заданную температуру 200 °С.

В настоящее время при комплексной автоматизации производств широко используют различные современные средства, включая блоки регулирования агрегатного комплекса АКЭСР, системы телемеханики типа ТМ-320 и др. Перспектива дальнейшего развития автоматического контроля и регулирования связана с внедрением в практику программно-управляемых универсальных микроэлектронных устройств — микропроцессоров — совместно с микроэлектронными операционными усилителями для запоминающих устройств, аналогово-цифровых и цифроаналоговых преобразователей. Реализация таких устройств с использованием микроЭВМ позволит значительно сократить габаритные размеры измерительной и регулирующей техники, повысить их надежность и быстродействие.

§ 6. Электронно-гидравлические регуляторы

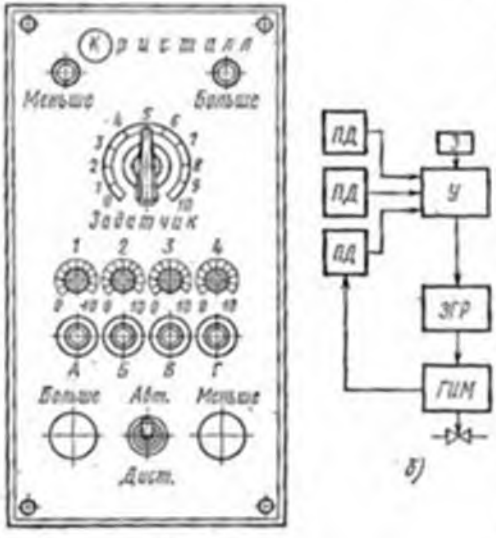
Электронно-гидравлическая система «Кристалл» широко используется при автоматизации теплотехнических и энергетических установок. По структуре схема «Кристалл» подобна схеме электронного регулятора Р-25 и позволяет осуществлять ПИ- и П-законы регулирования при постоянной скорости гидравлического исполнительного механизма *ГИМ*.

Структурная схема регулятора «Кристалл» показана на рис. 174, *б*.

Первичными датчиками *ПД* могут являться термометры сопр
тивления, дифманометры и дифтягомеры, которые включаются
устройством обратной связи ОС на вход бесконтактного транзи
торного усилителя *У*.

Если сигнал датчиков отличается от сигнала задания, устан
ленного задатчиком *З*, то на выходе усилителя *У* формируется си
нал, который подается
соответствующие обмот
электрогидравлическо
реле *ЭГР*, осуществля
щего управление исполн
тельным механизмом *ГИМ*.

Основные органы ко
роля и управления регул
тора «Кристалл» (рис. 17
а): потенциометры «Чув
вительность» *2*, *3*, *4* служ
для изменения напряжен
питания датчиков *ПП*; п
тенциометр «Нечувств
тельность» *1* определя
зону нечувствительнос
регулятора; задатчик, и
ющий десять оцифров
ных делений, служит
установки задания регу
тора; сигнальные та
«Меньше» и «Больше»
ределяют направление д
жения *ГИМ*; зажимы



а)

б)

Рис. 174. Регулятор «Кристалл»:
а — общий вид, *б* — структурная схема

Б, *В*, *Г* служат для контроля и настройки характеристик регул
ра путем изменения величины сопротивлений, подключаемы
зажимы *Б*, *В* (диапазон действия задатчика) и *В*, *Г* (нуль за
ка); тумблер «Авт.» — «Дист.» является переключателем р
работы регулятора; кнопки дистанционного управления «Б
«Меньше» позволяют вручную управлять исполнительным м
мом *ГИМ*.

§ 7. Машины централизованного контроля и регулирования

Комплексная автоматизация производств поставила новые
дачи, которые практически невозможно разрешить обычными сре
ствами контроля и регулирования. Основными задачами при ко
плексной автоматизации являются сбор и обработка информации
централизация контроля и автоматического управления.

Для решения таких технических задач используют новые средс
ва автоматики, называемые машинами централизованного контр
ля, регистрации, сигнализации и регулирования — МЦКР.