В. С. Мухин
И. А. Саков

ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И СРЕДСТВА АВТОМАТИКИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Одобрено Ученым советом
Государственного комитета СССР
по профтехобразованию
в качестве учебного пособия
для средних профессионально-
технических училищ

Москва
«Высшая школа» 1988

R1 размещены полюсы постоянного магнита. Под действием магнитного поля часть газового потока втягивается в трубку, в которой он охлаждает термометр *R1*; при этом повышается температура и снижается магнитная восприимчивость газового потока. Холодные слои потока, идущие следом, выталкивают нагретые, создавая магнитную конвекцию газового потока. Чем больше содержание кислорода в газе, тем сильнее охлаждается термометр *R1* и тем больше изменяется его сопротивление. В связи с тем что термометр *R2* омывает уже горячий газ, охлаждения его не происходит и сопротивление не меняется.

Рассмотренный принцип действия чувствительного элемента лежит в основе измерительной схемы газоанализатора МН по кислороду. Схема МН, построенная по компенсационно-мостовому методу измерения (рис. 64, *а*), содержит два моста. Первый мост, образованный резисторами *R1* и *R2*, омываемыми анализируемым газом *АГ*, и постоянными *R3* и *R4*, является рабочим *РМ*, второй мост, образованный резисторами *R1* и *R2*, омываемыми воздухом *В* из атмосферы, и постоянными *R3* и *R4*,— мостом сравнения *МС*. Поскольку концентрация кислорода в атмосфере постоянная, то и напряжение моста U_{cd} также постоянное.

При измерении концентрации кислорода в диагонали рабочего моста возникает электрическое напряжение U_{ab}, которое определяют в приборе компенсацией напряжения моста сравнения U_{cd}, снимаемого с реохорда $R_к$. Движок реохорда перемещается автоматически реверсивным двигателем вторичного прибора при наличии сигнала небаланса ΔU. Для проверки начального значения шкалы вторичного прибора в приемнике газовой смеси имеется шунт, который устраняет магнитное поле, в результате чего мост оказывается уравновешенным и напряжение $U_{ab}=0$. Достоинством двухмостовой схемы является независимость показаний прибора от колебаний напряжения питания и температуры окружающей среды из-за их совместного влияния на оба моста. Эту измерительную схему используют в приборах МН5106 и МН5130.

Кроме показывающего прибора в промышленный газоанализатор входит газовый приемник. Схема устройства отбора и подготовки пробы в газоанализаторе МН показана на рис. 64, *б*. Отбор пробы анализируемого газа осуществляется водоструйным эжектором *1*. Через керамический фильтр анализируемый газ по трубке *7* попадает в фильтр *5*, где очищается от сернистого газа и охлаждается проточной водой *6*. Затем он идет в фильтр тонкой очистки *8*, после

ББК 32.97
М 92
УДК 681.3:62—52

Рецензенты: канд. техн. наук Т. Е. Щедеркина (Московский энергетический институт), инж. В. Н. Пенкин (Московское районное управление энергетического хозяйства)

Мухин В. С., Саков И. А.

М 92 Приборы контроля и средства автоматики тепловых процессов: Учеб. пособие для СПТУ.— М.: Высш. шк., 1988.—256 с.: ил.

ISBN 5—06—001383—9

В книге приведено описание приборов контроля и средств автоматического регулирования теплоэнергетических процессов, в том числе автоматических регуляторов, исполнительных механизмов и регулирующих органов, рассмотрены особенности их эксплуатации в промышленных условиях, изложены способы измерения и контроля и др.

Книга может быть полезна при обучении рабочих на производстве.

М $\frac{2404000000\ (4307000000)—404}{052\ (01)—88}$ 56—88

ББК 32.97
6Ф7

ISBN 5—06—001383—9 © Издательство «Высшая школа», 1988

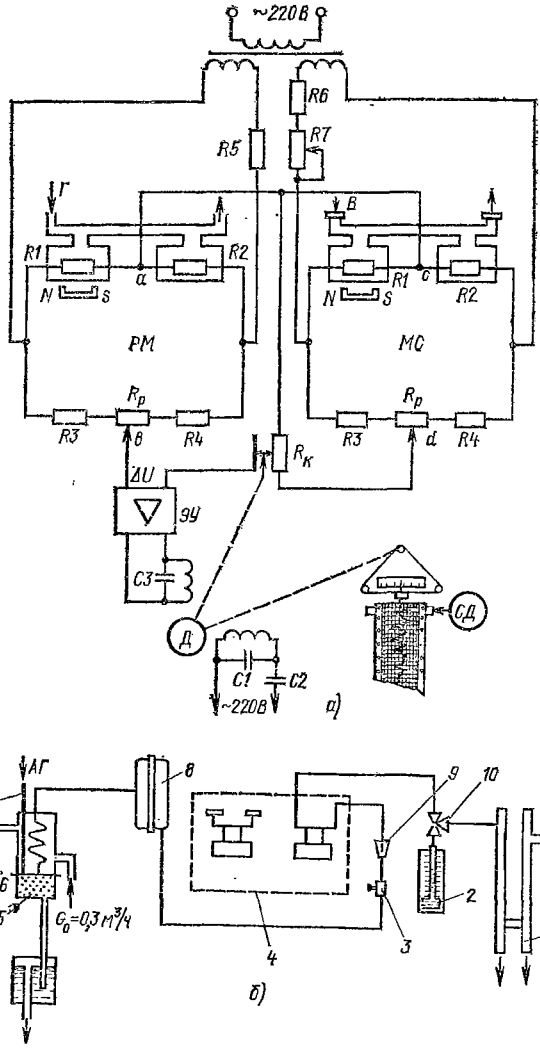


Рис. 64. Схемы автоматического газоанализатора МН:

а — измерительная, *б* — устройства отбора и подготовки пробы; *1* — эжектор, *2* — манометр, *3*, *10* — вентили, *4* — мост, *5*, *8* — фильтры, *6* — вода, *7* — трубка, *9* — ротаметр

ПРЕДИСЛОВИЕ

Автоматизация производственных процессов является одним из решающих факторов повышения производительности общественного труда. Особенно возрастает роль автоматизации в настоящее время, когда на первый план выдвинуты вопросы интенсивного развития производства, повышения его эффективности. Одной из основных задач структурной перестройки общественного производства является развитие топливно-энергетического комплекса страны и, в частности, полное удовлетворение растущих потребностей в различных видах топлива и энергии.

С повышением мощности установок по производству тепловой и электрической энергии быстро увеличивается количество регулируемых параметров и операций технологического цикла на тепловых электрических станциях (ТЭС). Качественная работа всех агрегатов ТЭС не может быть обеспечена без контроля и автоматизации производства. Поэтому наряду с традиционными средствами контроля и автоматизации ТЭС все шире применяют управляющие вычислительные комплексы, основным элементом которых являются электронные вычислительные машины, микропроцессоры и микро-ЭВМ.

Эффект внедрения автоматизированных и автоматических систем управления на производстве, в частности на тепловых электрических станциях, определяется не только техническими возможностями средств автоматизации, но и уровнем подготовки обслуживающего персонала, его квалификацией, умением ориентироваться в любых ситуациях, возникающих при ведении технологического режима. Помочь молодым рабочим получить квалификацию, которая будет соответствовать уровню требований современности, и является целью настоящего учебного пособия.

При работе над пособием авторами учтены изменения, которые произошли за последнее время в структуре средств контроля и автоматизации тепловых процессов на ТЭС. Кроме того, в книгу введены разделы по схемам автома-

чего поступает в рабочую камеру измерительного моста *4* газоанализатора. Для контроля расхода анализируемого газа и давления перед приемным устройством устанавливают ротаметр *9*, а за ним жидкостный манометр *2*. Регулировка расхода и давления газа осуществляется дроссельными вентилями *3* и *10*.

Газоанализаторы МН5106 выпускаются с диапазоном измерения кислорода от 0 до 10% и допустимой погрешностью +0,25%, а газоанализаторы МН5180 — с диапазо-

ГЛАВА I

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

§ 1. Измерение. Понятие о метрологии

В основе безопасной и экономичной работы тепловой электрической станции (ТЭС) лежат измерения технологических параметров.

Получение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств называют *измерением*. В этом определении под термином «физическая величина» понимают свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам, но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта. Часто словом «величина» обозначают количественное значение конкретной физической величины, например: величина давления равна 100 Па, величина напряжения равна 100 В и т. д. Так говорить неправильно. Здесь слово «величина» лишнее, поскольку давление и напряжение являются физическими величинами, поэтому следует говорить: «давление 100 Па, напряжение 100 В или значение давления равно 100 Па, значение напряжения — 100 В». Термин «физическая величина» используется только в отношении свойств объектов или их характеристик, которые измеряют, в противном случае говорят о качествах объекта (технологичность, ремонтопригодность и т. д.).

В основе любых измерений лежат различные физические явления, определяющие принцип измерения, например: измерение температуры с использованием термоэлектрического эффекта, измерение расхода газа или жидкости по перепаду давления на сужающем устройстве.

Теплотехнические измерения служат для определения многих физических величин, связанных с процессами генерации, преобразования и потребления (расходования) тепловой энергии. К ним относится определение как чисто тепловых (температуры, теплоемкости, энтропии), так и связанных с ними других физических величин (давления, расхода, уровня и т. д.).

температуры смеси и содержания воды обеспечивается ее охлаждением в холодильнике до требуемой температуры.

Существует одномостовая схема построения тепловых газоанализаторов (ТКГ, ГЭД, ГЭУК), когда платиновые электросопротивления, через которые проходит анализируемый газ, включены в противоположные плечи моста. Концентрация определяемого компонента CO_2 (или H_2, или SO_2) фиксируется милливольтметром, установленным в диагонали моста.

Во избежание влияния колебаний напряжения питания, температуры окружающей среды в измерительную схему прибора кроме рабочего моста (на который подается анализируемый газ) вводится мост сравнения. Принцип действия и устройство измерительной схемы тепловых газоанализаторов такие же, как и в автоматических газоанализаторах МН-5106 (см. рис. 64, *б*). Газоанализаторы, построенные по этой схеме, применяют на ТЭС для измерения углекислого газа в дымовых газах котлов, водорода в системе охлаждения турбин. Предельная погрешность тепловых газоанализаторов достигает $\pm 2{,}5\%$, а период установления показаний — 1—3 мин.

§ 47. Оптические и электрохимические автоматические газоанализаторы

В оптических газоанализаторах используется свойство газов поглощать электромагнитные колебания в определенной частотной области. Так, например, газы, содержащие два атома и более, поглощают инфракрасное излучение, а одноатомные газы — ультрафиолетовое излучение. Схема прибора инфракрасного излучения для определения содержания CO_2, CO, CH_4 в анализируемом газе состоит из источника излучения, светофильтра, диска с отверстиями для создания пульсаций излучения. Анализируемый газ поглощает излучение, нагревается, при этом возрастает его давление на подвижную мембрану. Мембрана, являющаяся одним из электродов электрической емкости, под действием пульсирующего давления перемещается, в результате чего на выходе прибора возникает электрическое напряжение, пропорциональное измеряемой величине.

В последнее время для измерения микроконцентраций токсичных газов в продуктах сгорания топлива используют электрохимические газоанализаторы, принцип действия которых основан на электрохими-

По способу получения измеряемой величины теплотехнические измерения разделяют на прямые и косвенные.

Прямые — это измерения, при которых искомое значение физической величины определяют непосредственно из опытных данных. Если обозначить через $[X]$ единицу измеряемой величины, а через x ее числовое значение, то искомое значение измеряемой величины $Q=x[X]$. Простейшими примерами прямых измерений являются определение температуры термометром, давления — манометром, электрического напряжения — вольтметром и т. д.

Косвенные — это измерения, при которых искомую величину находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, получаемыми в результате прямых измерений. В этом случае измеряемая величина определяется функциональной зависимостью $Y=f(X_1, X_2, \ldots, X_n)$, где f — символ функциональной зависимости; $X_1, X_2, \ldots, X_n$ — значения величин, измеренных прямым способом. Косвенными измерениями являются определение расхода жидкостей или газов, коэффициента полезного действия (кпд), удельных экономических показателей оборудования, различных неэлектрических величин (давления, температуры), преобразуемых в электрические измеряемые сигналы.

При измерениях физических величин никогда нельзя получить их истинного значения, что связано с несовершенством методов и средств измерений, с влиянием условий измерений, а также индивидуальными особенностями наблюдателей и др.

Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называют *погрешностью измерения.*

С уменьшением погрешности измерений повышается их точность. Качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины, называют *точностью измерений.* Для конкретных условий и целей измерения существует свой рациональный уровень точности, который нецелесообразно превышать из-за сложности соответствующих измерений.

В настоящее время для различных целей ежедневно выполняют большое количество измерений. В интересах всего народного хозяйства страны необходимо, чтобы результаты измерений одинаковых физических величин, полученные в разное время в различных местах с помощью измерительных средств, были равны или отличались на заданное значение, т. е. должно быть единство измерений.

ческих явлениях, происходящих в электродных системах, погруженных в фоновый раствор электролита с пропусканием через него анализируемого газа. Электрохимические газоанализаторы разделяют на кулоновские и вольт-амперные.

Принцип действия *кулоновских газоанализаторов* основан на связывании выделившегося при электролизе вещества с анализируемым газом так, что мерой концентрации газа является электрический ток. Кулонометрические газоанализаторы служат для измерения содержания микроконцентраций SO_2, H_2S, Cl_2, O_3.

Принцип действия *вольт-амперных газоанализаторов* основан на явлении деполяризации электрода анализируемым газом, при этом электрический ток в растворе пропорционален концентрации газа. Например, при измерении концентрации O_2 в качестве поляризованного электрода применяют катод, а фоновым электролитом служит раствор кислоты. Кислород, являясь активным деполяризатором, восстанавливается на катоде до перекиси водорода, вызывая прохождение через раствор поляризационного тока, который измеряется миллиамперметром.

§ 48. Химические газоанализаторы

Большое распространение для анализа дымовых газов получили переносные химические газоанализаторы периодического действия, которые могут быть индикаторами и сигнализаторами утечки газов. К приборам этой группы относят объемные электрохимические газоанализаторы. При этом содержание искомого компонента определяют по изменению объема или давления газовой смеси в результате ее сжигания, избирательного поглощения или химической реакции. Этими приборами можно измерить концентрацию в газовой смеси следующих элементов: CO_2, SO_2, H_2S, H_2, CO, O_2. Содержание CO_2 и SO_2 определяют по поглощению их раствором едкого кали, H_2 и CO — щелочным раствором полухлористой меди, O_2 — щелочным раствором пирогаллола, углеводородов — бромной водой. Погрешность рассматриваемого метода зависит от погрешности измерения объема или давления и стабильности температуры начального и остаточного объема взятой пробы газа.

Рассмотрим принцип действия газоанализатора ГХП-2 (рис. 65), предназначенного для измерения CO_2 и O_2. Прибор состоит из измерительной бюретки *3*, к которой через краны *10* подключены два поглотительных сосуда *5*

Единство измерений — это состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах, а погрешности известны с заданной вероятностью. Вопросами теории и практики обеспечения единства и необходимой точности измерений занимается метрология.

Метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. В настоящее время методологической основой метрологии является Государственная система стандартов, обеспечивающая единство измерений (ГСЕИ). В нее входит более 100 стандартов, регламентирующих: единицы физических величин; методы и средства передачи размеров единиц физических величин рабочим средствам измерений; номенклатуру и способы выражения погрешностей средств измерений; поверку используемых средств измерений для создания заданного уровня надежности метрологических характеристик; номенклатуру и способы представления результатов измерений.

§ 2. Единицы физических величин. Международная система единиц

Физическую величину, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице, называют *единицей физической величины*.

Первоначально единицы физических величин выбирали произвольно без какой-либо связи друг с другом, в результате чего появилось большое количество произвольных единиц одной и той же физической величины, что затрудняло сравнение результатов измерений, производимых различными наблюдателями. С развитием техники, а также международных связей трудности использования результатов измерений возрастали и тормозили научно-технический прогресс. Так, во второй половине XVIII в. в Европе насчитывались сотни футов различной длины, около полусотни разных миль, свыше 120 различных фунтов. Крупные научные открытия физики XIX в. в области механики и электричества позволили установить ряд важных закономерностей в природе, которые носили универсальный характер и устанавливали математические связи между физическими величинами. Это дало возможность немецкому ученому К. Гауссу предложить систему логически связанных единиц физических величин. По его методу произвольно выбирается независимо друг от друга несколько физических величин. Число их должно быть минимальным, а воспроизводиться они должны с наименьшей

и *6*. Сосуд *6* заполнен раствором едкого кали (для поглощения CO_2), а сосуд *5* — раствором пирогаллола (для поглощения O_2). Поскольку в сосуде *5* кроме кислорода поглощается и диоксид углерода, проба газа сначала поступает в сосуд *6*, а затем — в сосуд *5*. В бюретке находится жидкостный манометр *4*, одна трубка которого сообщается с атмосферой. Манометр служит для измерения давления газа после поглощения определяемого компонента. Бюретка термостатирована. Пробу газа с помощью груши *8* отбирают в сосуд *2* через фильтр *9* (для очистки газа). При опускании

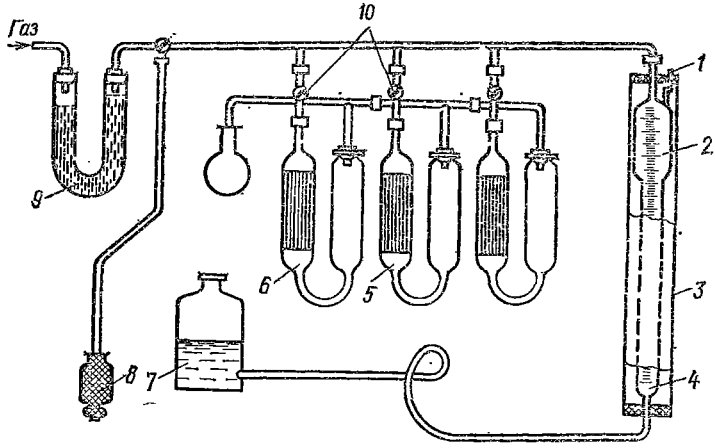


Рис. 65. Схема химического переносного газоанализатора ГХП: *1* — трубка, *2*, *5*, *6*, *7* — сосуды, *3* — бюретка, *4* — манометр, *8* — груша, *9* — фильтр, *10* — кран

напорного сосуда *7* бюретка заполняется газом, избыток которого удаляют через трубку *1*. При подъеме сосуда *7* его жидкость достигает конца трубки *1*, в результате чего перекрывается вывод газа в атмосферу (при этом отсекается проба газа 50 см³). Далее один из кранов *10* переключают в другое положение, при котором анализируемый газ сначала поступает в сосуд *6*, а затем в сосуд *5*. После прохождения газа через каждый сосуд определяют изменение его объема, по которому судят о концентрации измеряемого компонента газа. Недостатками электрохимических газоанализаторов, затрудняющими их применение на ТЭС, являются периодичность анализа, необходимость частой замены реактивов, сложность создания автоматического прибора.

погрешностью. Единицы этих величин называют *основными*. Далее, пользуясь установленными закономерностями, получают единицы других величин, называемые *производными*.

Рассмотрим, как получается единица производных физических величин. Представим производную величину Z в виде функциональной зависимости $Z = KA^l B^m \cdot \ldots \cdot R^n$, где A, B, ..., R — величины, единицы которых установлены; K — безразмерный коэффициент пропорциональности. Представим их в следующем виде: $A = a[A]$; $B = b[B]$ ...; $R = r[R]$, где $[A]$, $[B]$, ..., $[R]$ — единицы величин; a, b, ..., r — числовые значения этих единиц. Тогда $Z = Ka^l [A]^l b^m [B]^m \cdot \ldots \cdot r^n [R]^n$.

В таком же виде представим производную величину $Z = z[Z]$. Подставляя Z в предыдущее равенство и приравнивая числовые значения z значениям комплекса $a^l b^m \ldots r^n$, получим $[Z] = [A]^l [B]^m \cdot \ldots \cdot [R]^n$, т. е. новая единица производной величины выражается через известные единицы других величин при заданной аналитической зависимости.

Совокупность основных и производных единиц называют *системой единиц физических величин*.

Часто для выражения больших или малых значений измеряемой величины приходится применять кратные и дольные единицы. Единицы, которые составляют целое число основных или производных единиц (например, килограмм, мегагерц, килокалория), называют *кратными*, а единицы, которые в целое число раз меньше основных или производных единиц (например, миллиметр, наносекунда), — *дольными*. Кроме того, наряду с системными единицами физических величин могут существовать единицы, не входящие в систему, называемые *дополнительными*.

Система единиц должна обладать следующими свойствами: универсальностью (метод построения системы не связан с конкретными физическими величинами); минимальным числом основных единиц (необходимым для образования логически непротиворечивых производных единиц, охватывающих все виды измерений); независимостью выбора основных единиц от их количественных значений (например, в качестве единицы длины выбирают любую — метр, дюйм, сажень, при этом производные единицы зависят от выбранной основной).

Первоначально были системы единиц, в которых основными являлись три единицы: длины, массы и времени.

§ 49. Хроматографические газоанализаторы

Газовая хроматография основана на двух процессах: адсорбционном разделении газовых смесей на отдельные компоненты и последующем (поочередном) определении их содержания в смеси газа.

Хроматографические приборы (хроматографы) предназначены для анализа газовых смесей. В последнее время их

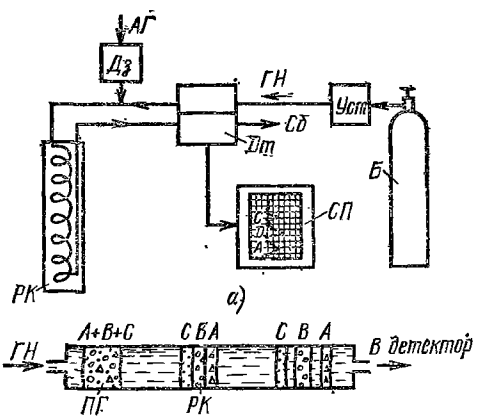


Рис. 66. Схема хроматографического газоанализатора (*а*) и разделение смеси газов в разделительной колонке (*б*):

Сб — сброс, *АГ* — анализируемый газ

стали использовать для анализа состава жидкостей и твердых тел. Хроматографы являются приборами периодического действия, их отличает от других подобных приборов высокая чувствительность, точность и малое время анализа.

Схема хроматографического газоанализатора показана на рис. 66, *а*. В разделительную колонку *РК*, заполненную твердым или жидким сорбентом, непрерывно поступает с постоянной скоростью (регулируется устройством *Уст*) газноситель *ГН* измеряемой смеси из баллона *Б*. В теплоэнергетике при определении горючих компонентов в качестве газа-носителя служит воздух, а негорючих — инертные газы (N_2, A_r). В качестве твердых сорбентов используют активированный уголь. Перед *РК* в поток газа-носителя периодически вводится дозатором *Дз* проба *ПГ* (рис. 66, *б*) исследуемой газовой смеси, содержащая, допустим, компоненты *А*, *В* и *С*. Для каждой колонки, вида газа и детектора

Они охватывали широкий круг задач механики. Большое распространение получили системы единиц МКС (метр — килограмм — секунда) и СГС (сантиметр — грамм — секунда). Поскольку системы механических единиц не охватывали теплотехнику, к ним добавили еще одну основную единицу — градус температурной шкалы (системы МКСГ), а для электрических и магнитных измерений — единицу силы тока — ампер (система МКСА).

Существование различных систем единиц физических величин и большого количества дополнительных единиц, рост научно-технического прогресса и экономических связей между странами выдвинули требование унификации единиц измерения в международном масштабе. В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам утвердила проект Международной системы физических единиц СИ, который нашел отражение в рекомендациях Международной организации по стандартизации (ИСО). В 1961 г. Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР разработал и выпустил ГОСТ 9867—61, которым утверждалась система СИ во всех областях науки и техники, а также при обучении.

Основными единицами СИ являются: длина — метр (м); масса — килограмм (кг); время — секунда (с); термодинамическая температура — Кельвин (К); сила электрического тока — ампер (А); количество вещества — моль; сила света — кандела (кд), дополнительными единицами — плоский угол — радиан (рад) и телесный угол — стерадиан (ср).

Все остальные единицы физических величин в СИ — производные. Они образуются с помощью простейших уравнений, которые отражают их связь с основными единицами системы. Коэффициент пропорциональности в этих формулах равен единице, что является преимуществом СИ перед другими системами. Это свойство системы называют *когерентностью*.

В СИ производную единицу находят по размерностям основных. Например, в СИ единица силы $F=m/a$, (m — масса тела, a — его ускорение) имеет следующую размерность: $[F]=[m][a]=\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$.

Понятие размерности физической величины важно, так как оно используется в физике и технике при проверке правильности сложных формул, выяснении зависимости между величинами, в теории подобия. Некоторые производные единицы, найденные по правилу размерностей, имеют в СИ собственное наименование, например:

Дт существует оптимальный объем пробы газа, который снизу определяется чувствительностью *Дт*, а сверху — его разрешающей способностью. В среднем объем пробы от 0,1 до 20 см³. Далее при взаимодействии анализируемых компонентов с сорбентом происходит их разделение по скорости движения: первыми движутся плохо сорбируемые газы, последними — хорошо сорбируемые.

Таким образом, после разделения каждый компонент вместе с газом-носителем образует бинарную смесь, анализ которой может быть выполнен уже описанными методами в детекторе *Дт*. Выходной сигнал *Дт* подается на самопишущий прибор *СП*, на диаграмме которого появляется кривая в виде горизонтальных пиков различной длины, характеризующих содержание компонентов *A*, *B*, *C* в смеси газов. Основания пиков лежат на нулевой линии, соответствующей выходу чистого газа-носителя. При градуировке прибора устанавливается связь между концентрацией газа и длительностью пика, его площадью и высотой.

В теплоэнергетике для анализа дымовых газов применяют переносный хроматограф «Газохром 3191», который служит для определения концентрации O_2, CO_2, N_2, NO, H_2, CO и углеводородов с точностью до $+5\%$. Детектор в этих хроматографах является комбинированным. В одном плече неуравновешенного моста имеется термохимический элемент, реагирующий на выделение теплоты при реакции каталитического окисления горючих компонентов, а в другом (соседнем) плече — элемент, реагирующий на изменение теплопроводности газа. Продолжительность полного анализа проб дымового газа — 10 мин.

§ 50. Анализ состава жидкостей и паров. Методы анализа растворов

Экономная и безаварийная работа основного и вспомогательного оборудования на ТЭС во многом зависит от качества питательной и добавочной химически обессоленной воды, а также качества насыщенного пара.

Ухудшение качества воды и пара вызывает содержание солей натрия, кальция, магния, кремниевой кислоты, растворенного кислорода, ионов водорода (величина pH), характеризующих кислотные и щелочные свойства воды. При наличии этих примесей в питательной воде котлоагрегатов возникают коррозия металла труб, накипеобразование и выпадение шлама, что ухудшает теплоотдачу к воде и может

сила — ньютон (Н), кг·м·с$^{-2}$; давление — паскаль (Па), м$^{-1}$·кг·с$^{-2}$; энергия, работа, количество теплоты, энтальпия — джоуль (Дж), м^{2}·кг·с$^{-2}$; мощность — ватт (Вт), м^{2}·кг·с$^{-3}$; электрическое напряжение — вольт (В), м^{2}·кг × × с$^{-3}$·А$^{-1}$; электрическое сопротивление — ом (Ом), м^{2}·кг × × с$^{-3}$·А$^{-2}$.

Кратные и дольные единицы в СИ образуются с помощью множителей умножением или делением основной единицы на числа, кратные 10. Наименования кратных и дольных единиц получают добавлением специальных приставок к названию основной единицы (табл. 1).

Таблица 1. **Кратные и дольные единицы системы СИ**

Множитель	Приставка	Обозначение приставки	Множитель	Приставка	Обозначение приставки
10^{12}	тера	Т	10^{-1}	деци	д
10^{9}	гига	Г	10^{-2}	санти	с
10^{6}	мега	М	10^{-3}	милли	м
10^{3}	кило	к	10^{-6}	микро	мк
10^{2}	гекто	г	10^{-9}	нано	н
10	дека	да	10^{-12}	пико	п

Международная система единиц должна заменить все прочие системы единиц. Однако переход на новую систему

Таблица 2. **Соотношения некоторых тепловых внесистемных единиц с единицами СИ**

Величина	Единица		Значение в единицах СИ
	наименование	обозначение	
Время	час	ч	3600 с
	минута	мин	60 с
Объем	литр	л	1,000028·10^{-3} м^{3}
Мощность	лошадиная сила	л. с.	735,499 Вт
Работа	киловатт-час	кВт·ч	3,6·10^{6} Дж
Количество теплоты	калория	кал	4,186 Дж
	килокалория	ккал	4,186·10^{3} Дж
Температура	градус Цельсия	°С	$T = 273,16$ К
Давление	бар	бар	10^{5} Па
	миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	133,322 Па
	миллиметр водяного столба	мм вод. ст.	9,80665 Па
	техническая атмосфера	ат, или кгс/см^{2}	9,80665·10^{4} Па

вызвать пережог труб со стороны продуктов сгорания топлива. Наличие этих же примесей в паре вызывает пережог труб пароперегревателей, занос солями лопаток турбин. Последнее обстоятельство приводит к появлению дополнительных нагрузок на ротор турбины, что вызывает износ подшипников, осевой сдвиг ротора и выход турбин из строя.

Допускаемое содержание в питательной воде и паре различных примесей регламентируется «Правилами технической эксплуатации электрических станций» и зависит как от вида котлоагрегата, так и от номинального давления пара.

Для обеспечения постоянного химического контроля качества воды и пара на ТЭС применяют ряд автоматических измерительных приборов, например солемеры (кондуктометры), кислородомеры, pH-метры и т. д. Измерительные преобразователи этих приборов на выходе имеют унифицированный сигнал постоянного тока. Подобно газоанализаторам приборы для анализа жидкостей представляют собой измерительные установки, в которых кроме первичных и измерительных преобразователей имеются вспомогательные устройства для отбора анализируемой пробы, ее подготовки и транспортировки. Пробу отбирают с помощью зондов, которые устанавливают так, чтобы их косой срез или канал был направлен навстречу потоку. Анализируемая проба должна иметь температуру не более 40 °С, давление не более 0,14 МПа и расход от 10 до 30 кг/ч. Снижение параметров жидкости до указанных значений осуществляется в устройстве подготовки пробы.

Для определения концентрации солей в питательной воде и паре на ТЭС применяют с о л е м е р ы, которые градуируются в единицах условного солесодержания, обычно в процентах содержания NaCl. Принцип действия солемеров основан на измерении меняющейся в зависимости от солесодержания электрической проводимости жидкости или пара. На ТЭС в паре и жидкости с малым содержанием солей на электропроводность оказывают влияние растворенные газы, из которых образуются ионы H^+, NH_4^-, OH^- и т. д. В результате показания солемера искажены. Для устранения искажений анализируемую пробу растворенных газов необходимо пропустить через Н-катионитные фильтры, осуществить дегазацию и повысить концентрацию солей упариванием раствора.

Концентрация солей в растворе зависит от значения тока между электродами, помещаемыми в него. Это устройство образует первичный преобразователь солемера, который включается в измерительную схему, выполненную в виде

осуществляется постепенно. В настоящее время Государственными стандартами допускается ряд распространенных внесистемных единиц. Соотношения этих единиц с единицами СИ приведены в табл. 2.

§ 3. Средства и методы измерений

Все измерения выполняют с помощью технических средств, которые имеют нормированные погрешности и называются *средствами измерений*. Они являются материальной основой измерений физических величин. Совокупность приемов использования принципов и средств измерений называется *методом измерений*.

Разработка и производство средств измерений является главной задачей такой отрасли промышленности, как приборостроение.

К основным видам средств измерений относят меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, информационно-измерительные системы.

М е р а — средство измерений, предназначенное для воспроизведения одного или нескольких известных значений физической величины. Например, гиря — мера массы, температурная лампа — мера яркостной или цветовой температуры, измерительная колба — мера объема. Перечисленные меры воспроизводят одно значение физической величины, т. е. являются *однозначными*. К этим мерам относят также образцовые вещества. Меры, воспроизводящие несколько значений физической величины (например, линейка, конденсатор переменной емкости, переменное сопротивление), называют *многозначными*. Наряду с мерами существуют магазины мер, т. е. их наборы, в которых меры объединены в единое конструктивное целое с устройством для их соединения в различных сочетаниях (магазин сопротивлений, магазин индуктивностей).

Физические величины измеряют мерами методом сравнения. В некоторых случаях используют метод противопоставления (например, измерение массы на равноплечих весах гирями) или метод совпадения (измерение длины линейкой).

На мере указывается значение величины $X_{\text{ном}}$, называемое номинальным. Разность между номинальным и действительным (истинным) значениями определяет *погрешность меры*, называемую абсолютной. Поскольку истинное значение меры остается неизвестным, на практике поль-

уравновешенного моста (рис. 67). Во избежание явления поляризации электродов мост получает питание от источника переменного напряжения 220 В с частотой тока 50 Гц. Мост состоит из трех постоянных манганиновых резисторов *R1—R3* и первичного преобразователя R_x. Конденсатор $C_к$ служит для компенсации межэлектродной емкости в этом преобразователе. Так как температура анализируемого раствора существенно влияет на электрическую проводимость, для ее компенсации последовательно с R_x включается медный резистор $R_м$, сопротивление которого увеличивается с ростом температуры. При измерении содержания солей

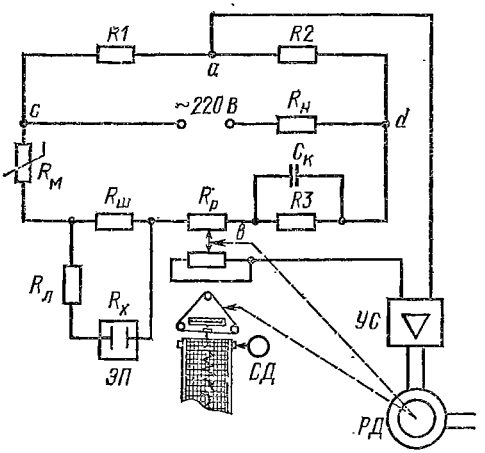


Рис. 67. Измерительная схема солемера

сигнал небаланса моста поступает на усилитель *УС*, выходной сигнал которого подается на реверсивный двигатель *РД*. Последний перемещает показывающую стрелку и движок реохорда $R_р$, в результате чего происходит уравновешивание моста.

На ТЭС распространены также солемеры КК с диапазоном измерения от 10^{-6} до 1 См/см и предельной погрешностью $\pm 2{,}5\%$. Недостатком этих солемеров является загрязнение электродов солями, находящимися в растворе, что требует их периодической очистки.

Качество питательной воды характеризуется не только солесодержанием, но и ее кислотностью или щелочностью. Поэтому контроль щелочности и кислотности воды особенно важен в процессе докотловой обработки питательной воды.

зуются действительным значением меры $X_д$, т. е. абсолютная погрешность $\Delta X = X_{ном} - X_д$. Действительное значение меры можно определить с помощью средств измерений повышенной точности (эталонов, образцовых средств измерений).

Измерительный преобразователь — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поддающегося непосредственному восприятию наблюдателем.

Эти преобразователи являются составными частями приборов и измерительных систем. По месту, занимаемому в приборах, измерительные преобразователи разделяют на первичные *ПП1*, промежуточные *ПП2*, масштабные (усилительные) *МП* и передающие *ПП3* (рис. 1).

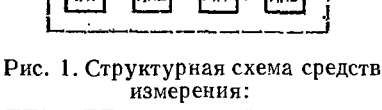


Рис. 1. Структурная схема средств измерения:
ПП1 — ПП3 — первичный, промежуточный и передающий преобразователи, *МП* — масштабный преобразователь

Первичным преобразователем называется устройство, к которому подводится непосредственно измеряемая физическая величина, т. е. он находится первым в измерительной цепи. Часто такие преобразователи называют датчиками (например, термоэлектрический термометр, сужающее устройство расходомера).

Преобразователь, занимающий в измерительной цепи место после первичного, называют промежуточным.

Преобразователь, предназначенный для изменения величины в заданное число раз, называют масштабным или усилительным (например, измерительный трансформатор тока, делитель напряжения, измерительный усилитель), а предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации,— передающим (например, индуктивный или пневматический преобразователь).

В последнее время в связи с применением в измерительной технике различных ЭВМ и микропроцессоров получают распространение аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые преобразователи (ЦАП). Первые преобразователи служат для преобразования аналоговых сигналов в цифровые, изменяющиеся дискретно во времени с постоянным шагом Δt (рис. 2, *а*, *б*), вторые — для преобразования дискретных по времени сигналов в аналого-

Кислотность или щелочность воды определяют по изменению активной концентрации ионов водорода, которая выражается в единицах десятичного логарифма $pH = -\lg C_{H^+}$, поэтому измерительные приборы называют pH-метрами.

Чистая вода диссоциирует на ионы водорода H^+ и ионы гидроксила OH^-. При 22 °С константа диссоциации воды $K_{H_2O} = C_{H^+} C_{OH^-} = 10^{-14}$, откуда $C_{H^+} = C_{OH^-} = 10^{-7}$, а pH = 7. При растворении в воде кислот концентрация H^+ повышается, а значение pH уменьшается, а при растворении щелочей, наоборот, значение pH увеличивается, что свидетельствует о характере измеряемой среды. Для водных растворов значение pH изменяется от 0 до 14.

В промышленных условиях величину pH измеряют с помощью рабочего стеклянного электрода (рис. 68, *а*), выполненного из стеклянной трубки *2*, к концу которой припаяна мембрана *1* из литиевого стекла. На внешней поверхности мембраны при погружении в раствор появляется электрический потенциал E_1 (рис. 68, *б*), зависящий от концентрации ионов водорода H^+ в растворе, которые, отнимая электроны у лития, восстанавливаются на мембране, при этом положительные ионы лития переходят в раствор, образуя потенциал E_1. Внутри трубки находится раствор кислоты *3* постоянной концентрации, замыкающий электрическую цепь между мембраной *1* и электродом *4* с выходным проводом *5*. Потенциалы E_2 (между электродом и кислотой) и E_3 (между кислотой и внутренней поверхностью мембраны) постоянные и зависят только от температуры раствора.

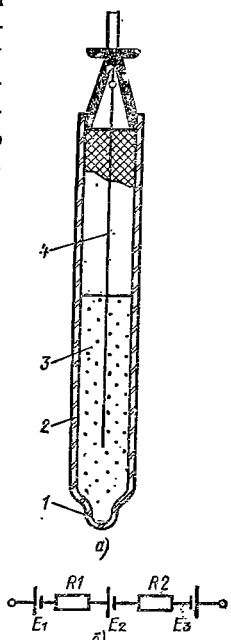


Рис. 68. Рабочий стеклянный электрод pH-метра (*а*) и его электрическая схема замещения (*б*)

Для измерения равновесного потенциала E_1 необходимо ввести второй электрод, выполненный из серебра, называемый *вспомогательным* или *электродом сравнения*. Этот электрод окружен кристаллами хлористого серебра, которые омываются раствором хлористого калия. По концентрации ионов Cl^- определяется потенциал вспомогательного

вые (рис. 3,*а*, *б*). В измерениях на ТЭС чаще всего применяют АЦП.

Условно измерительный преобразователь можно представить в виде блока (рис. 4). Поскольку выходной сигнал не наблюдается, в паспорте преобразователя указывается градуировочная характеристика, выражающая зависимость

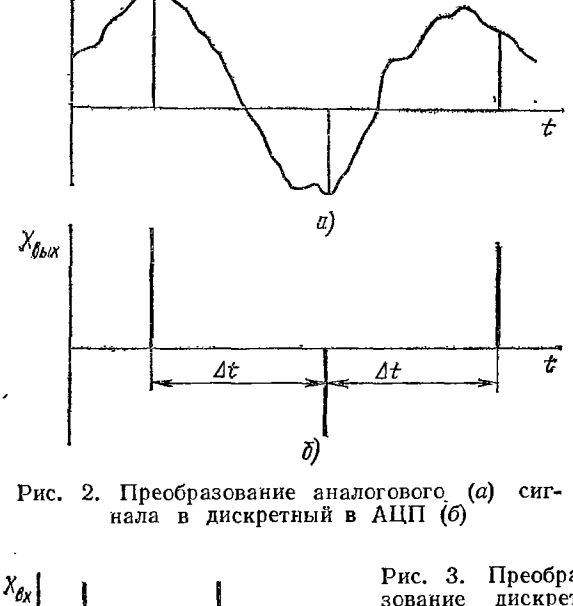


Рис. 2. Преобразование аналогового (*а*) сигнала в дискретный в АЦП (*б*)

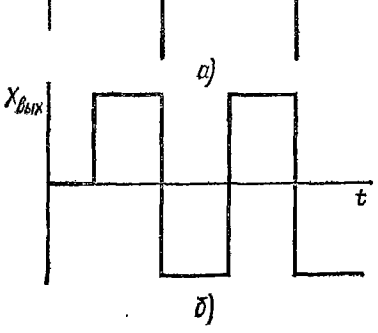


Рис. 3. Преобразование дискретного (*а*) сигнала в аналоговый в ЦАП (*б*)

Рис. 4. Измерительный преобразователь

электрода. Общее напряжение равно алгебраической сумме всех потенциалов этого измерительного устройства.

Для устройства, состоящего из рабочего ЭСП-ОС и вспомогательного электродов, градуировочная характеристика определяется уравнением $E=-3{,}3-(54{,}197+0{,}198t_р^\circ)\times$ $\times$ (pH—3,25). При pH=3,25, называемой *изопотенциальной точкой раствора*, показания прибора не зависят от его температуры $t_р^\circ$. В устройствах другого типа координаты изопотенциальной точки могут отличаться от значения 3,25, что и определяет их выбор по диапазону измеряемого pH.

Выпускаемые промышленностью рабочие стеклянные и вспомогательные электроды стандартизированы. Их снабжают дополнительной арматурой, обеспечивающей разме-

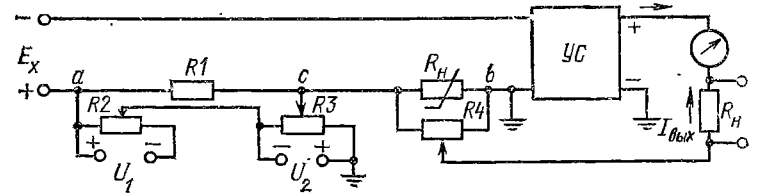


Рис. 69. Измерительная схема преобразователя pH-метра с унифицированным токовым сигналом

щение электродов в объектах и защиту от повреждений. Электродные системы pH-метров выпускают магистральные (ДМ), погруженные ($ДП_т$) и проточные (ДПР). Первые помещают в трубопровод с анализируемой средой, вторые — в резервуар, а через последние протекает подготовленная проба раствора.

Из-за большого электрического сопротивления рабочего электрода измерительные приборы должны иметь высокое входное сопротивление. Таким сопротивлением обладают приборы с компенсационным методом измерения.

Рассмотрим принципиальную схему измерительного преобразователя pH-метра с токовым выходом (рис. 69). Сигнал от электродной системы E_x практически полностью компенсируется напряжением U_{ab}. Сигнал U_{ab} складывается из двух напряжений. Одно напряжение (U_{ac}) снимается с резистора *R1* и зависит от реостатов *R2* и *R3*, при этом движки реостатов устанавливают так, чтобы это напряжение компенсировало измеряемую эдс E_x в изопотенциальной точке. Другое напряжение (U_{bc}), являющееся напряжением отрицательной обратной связи, подается на переменный ре-

между входной $X_{вх}$ и выходной $X_{вых}$ величинами. Эту зависимость, представляемую в виде таблицы, графика, но чаще в виде формулы $X_{вых}=f(X_{вх})$, называют *статической характеристикой преобразователя*. Среди статических характеристик преобразователей наиболее распространена линейная зависимость $X_{вых}=a+KX_{вх}$, где a, K — постоянные размерные числа.

Нелинейная зависимость в преобразователях допускается в исключительных случаях.

В измерительных преобразователях различают два вида погрешности — на входе и выходе. Абсолютная погрешность на входе $\Delta_{вх}=X_{вх.д}-f^{-1}(X_{вых.д})$, а на выходе $\Delta_{вых}=X_{вых.д}-f(X_{вх.д})$ ($X_{вх.д}$, $X_{вых.д}$ — действительные значения входного и выходного сигналов; f^{-1} — функция, обратная функции статической характеристики f). В общем случае $\Delta_{вх}\neq\Delta_{вых}$.

Измерительный прибор — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Этот вид средств измерений чаще всего используют при эксплуатации энергетического оборудования на ТЭС. В отличие от меры измерительный прибор не воспроизводит значение измеряемой величины, она подводится к прибору извне. Прибор, который, так же как преобразователь, можно представить в виде блока (см. рис. 4), выдает в процессе измерения числовое значение величины ($X_{вх}$ — измеряемая величина, а $X_{вых}$ — показания прибора).

Измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины, называют *аналоговым*, а прибор, показания которого представлены в виде цифр,— *цифровым*.

По способу отсчета значений измеряемых величин приборы разделяют на показывающие (допускающие считывание показаний) и регистрирующие — печатающие (показания выдаются в числовой форме на бумажной ленте) и самопишущие (запись показаний дается на графике или диаграмме).

По способу построения измерительной схемы различают приборы прямого действия, сравнения, автоматической компенсации.

В *измерительных приборах прямого действия* предусматривается одно или несколько преобразований измерительного сигнала в одном направлении (см. рис. 1). Измерительная цепь таких приборов является последователь-

зистор $R4$ (для корректировки крутизны градуировочной кривой) и медный резистор $R_м$, который имеет ту же температуру, что и анализируемый раствор.

При увеличении температуры E_x возрастает также сопротивление медного резистора $R_м$, благодаря чему компенсация изменений температуры происходит при том же выходном токе. В изопотенциальной точке за счет тока, создаваемого источником U_2, происходит компенсация выходного тока, т. е. $U_{bc}=0$, а $U_{ab}=-(E_x-\delta)$ (δ — малый сигнал небаланса, определяющий выходной ток от 0 до 5 мА). К наиболее распространенным относят измерительные приборы РН-201 и РН-261. Приборы РН-201 имеют пять диапазонов измерения pH, рассчитаны для работы в среде при температуре до 150 °С и давлении до 1,2 МПа. Основная допустимая погрешность их $\pm 1\%$.

Поверку промышленных pH-метров осуществляют по буферным растворам (pH задано) в комплекте с образцовым электродом сравнения.

Для автоматического определения содержания кислорода, растворенного в питательной воде, служат промышленные кислородомеры с унифицированным токовым сигналом, в принципе действия которых лежит кондуктометрический метод (взаимодействие кислорода O_2 с металлическим таллием Tl). В результате химической реакции образуется гидроксид таллия (TlOH), разлагающийся в водном растворе на ионы. При этом электропроводность пробы воды будет меняться пропорционально содержанию растворенному в воде кислорода. Достоинством этого метода измерения кислорода являются высокая чувствительность и точность, а также надежная работа в течение длительного времени, а недостатком его — большая токсичность таллия.

Разработано два промышленных таллиевых кислородомера с различными диапазонами измерений — АК-300 и АКП. В частности, диапазон измерений АК-300 составляет от 0 до 30 мкг/кг O_2 при предельной погрешности $\pm 6\%$. Продолжительность измерения кислорода указанным методом не превышает 10 мин.

§ 51. Эксплуатация приборов, измеряющих состав жидкостей и газов

Качество и надежность работы промышленных приборов анализа состава жидкостей и газа зависят от места, способа и отбора пробы, а также от соблюдения требований к характеристикам вещества, поступающего в приемник прибора.

ной. Приборы прямого действия просты, надежны, обладают хорошим быстродействием, но имеют невысокую точность измерений и высокую потребляемую мощность от объекта измерения, чувствительны к помехам. К ним относят, например, манометры, амперметры.

Измерительные приборы сравнения предназначены для сравнения измеряемых величин с величиной, воспроизводимой мерой M (рис. 5). В таких приборах используют дифференциальный или нулевой метод измерения. При дифференциальном методе на измерительное устройство *ИУ* прибора воздействует разность измеряемой величины



Рис. 5. Структурная схема измерительных приборов сравнения:

ПП и *МП* — первичный и масштабный преобразователи, *ИУ* — измерительное устройство, *М* — мера

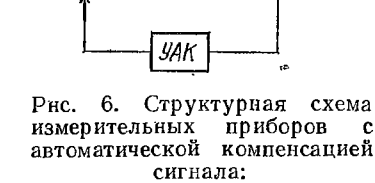


Рис. 6. Структурная схема измерительных приборов с автоматической компенсацией сигнала:

ИУ — измерительное устройство, *УАК* — устройство автоматической компенсации

и заданного значения меры, находящейся в нем. При нулевом методе за счет изменения значения меры результат разности доводится до нуля.

Измерительные приборы сравнения в отличие от приборов прямого действия имеют более высокую точность измерений и меньшую чувствительность к помехам, однако дороже, ненадежны, имеют погрешности и требуют частых поверок. К ним относят электроизмерительные потенциометры, логометры.

В *измерительных приборах автоматической компенсации* сравнивают измеряемую величину с компенсирующим сигналом, идущим по линии обратной связи от выходного сигнала прибора (рис. 6). Эти приборы обладают достоинствами первых двух видов, но отличаются от них недостаточным быстродействием. К ним относят автоматические потенциометры и уравновешенные мосты.

Для аналоговых измерительных приборов характерны отсчетные приспособления, состоящие из шкалы и указателя.

Совокупность последовательно нанесенных отметок, соответствующих ряду значений измеряемой величины, на-

Эти требования относят к температуре, давлению, расходу вещества, наличию в нем механических, агрессивных и других примесей. Кроме того, необходимо регулярно осуществлять техническое обслуживание приборов анализа, предусмотренное документацией.

Место отбора пробы должно обеспечить представительность состава анализируемого вещества, т. е. по составу она должна соответствовать среднему значению (по сечению или высоте) измеренного параметра.

Пробы вещества должны отбираться в сечениях трубопроводов с установившимся потоком среды, вдали от мест ее ввода или вывода, а также от гидравлических сопротивлений. В частности, для газа не рекомендуется брать пробы из нижних точек трубопроводов, где скапливаются влага и механические примеси, а для жидкости — наоборот, из верхних точек трубопроводов, где скапливаются газы и накипь. При анализе пробы вещества полностью исключается контакт с атмосферой. Анализ состава насыщенного пара проводят в таком сечении труб, где нет сепарации влаги. Это связано с различной концентрацией примесей в паре и воде.

Пробу вещества отбирают с помощью трубчатого зонда, конец которого имеет скос 45° навстречу потоку и глубину погружения до 20 см. Для первоначального отделения анализируемого вещества от механических примесей используют сетчатые или керамические фильтры, окружающие отборную трубку. Фильтр периодически очищают, продувая воздухом. Линии, по которым проба поступает в вспомогательное устройство и анализатор, должны иметь некоторый уклон и допускать их периодическую продувку.

Вспомогательные устройства служат для подготовки проб вещества и их транспортировки через анализатор. К ним относят дроссельные шайбы, регулировочные вентили, редуцирующие устройства для снижения давления анализируемой пробы вещества. Снижение температуры пробы происходит в противоточных теплообменниках с расходом охлаждающей воды до 300 кг/ч. К вспомогательным устройствам также относят сепараторы (для удаления растворенных газов в жидкости или жидкости в газе), камеры дожигания отдельных газов пробы, которые влияют на показания прибора, различные механические и химические фильтры для удаления примесей (например, Н-катионитные, тканевые влагопоглощающие фильтры, активированный уголь).

При отборе проб веществ, находящихся под давлением,

зывают *шкалой*. Расстояние между двумя соседними отметками называют длиной деления шкалы, а разность между значениями этих отметок — *ценой деления шкалы*.

Показания прибора отсчитывают по взаимному расположению указателя *2* и отметок шкалы *1* (рис. 7, *а*, *б*). Область показаний шкалы, ограниченную ее конечным и начальным значениями, называют *диапазоном измерения*, а наибольшее и наименьшее значения диапазона — соответственно *верхним и нижним пределами измерения*.

Числовые отметки на шкалах обычно обозначают размер измеряемой величины. Иногда на шкалы наносятся



Рис. 7. Показывающие (*а*) и самопишущие (*б*) измерительные приборы

проценты или их доли. Нанесение отметок на шкалу по действительным значениям измеряемой величины называют *градуировкой*. Значения величины, обозначенные на шкале прибора, обычно кратны пяти.

В цифровых измерительных приборах (ЦИП) шкала и указатель отсутствуют. Результат измерения считывают по цифрам выходного кода, высвечиваемым в окошечках прибора (рис. 8), причем их число соответствует числу разрядов кода. Наиболее часто в ЦИП применяется десятичный код. Цена деления условной цифровой шкалы прибора определяется единицей наименьшего разряда применяемого кода.

Одной из важнейших характеристик измерительного прибора является *чувствительность* — отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины $C=\Delta X_{\text{вых}}/$

необходимо поддерживать постоянным их расход через газоанализатор без специальных устройств. В других случаях для отбора проб дополнительно подключают отсасывающие устройства, например эжекторы, вакуумные насосы. Расход поступающего вещества контролируется ротаметрами.

Важный показатель газоанализаторов — запаздывание в получении результатов измерения. Для установки измеряемых значений в газоанализаторах нужна трех-пятикратная смена объема вещества, поэтому газоанализаторы газов и жидкостей обычно размещают вблизи точек отбора проб. Уменьшение времени запаздывания достигается за счет байпасирования. Поверку показаний промышленных приборов — газоанализаторов выполняют по образцовым веществам с прилагаемыми лабораторными газоанализаторами.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия газоанализаторов?
2. Почему контроль качества горения осуществляют по кислороду?
3. Каков принцип действия термомагнитных кислородомеров?
4. Чем отличаются автоматические газоанализаторы от переносных и каковы их достоинства и недостатки?
5. Как проверить чувствительность газоанализатора?
6. Для чего определяют состав воды на ТЭС?
7. Что такое солемеры и каков принцип их действия?
8. Как определяют активную концентрацию ионов водорода?
9. Какой металл используют для измерения концентрации кислорода в воде?
10. Какие предъявляют основные требования к установке приборов на ТЭС, измеряющих состав газов и жидкостей?

ГЛАВА VIII

ОСНАЩЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОТЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

§ 52. Общие сведения

Развитие тепловой энергетики происходит по пути роста единичных мощностей энергоблоков. Повышаются номинальные значения технологических параметров, которые приближаются к предельно допустимым для обеспечения безаварийной работы оборудования. Так, температура пере-

$/\Delta X_{вх}$. Чувствительность и цена деления шкалы прибора — две взаимно обратные величины. Так, два однотипных термометра имеют шкалы по 100 делений, но с диапазонами 0—50 °С и 0—100 °С. Цена деления первого термо-

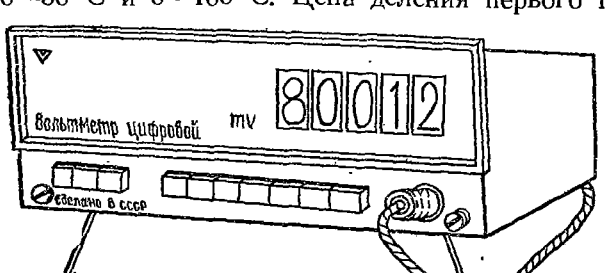


Рис. 8. Цифровой измерительный прибор

метра — 0,5 °С, а второго — 1 °С, т. е. первый термометр чувствительней второго.

Другой важной характеристикой измерительного прибора является *вариация показаний* — наибольшая их раз-

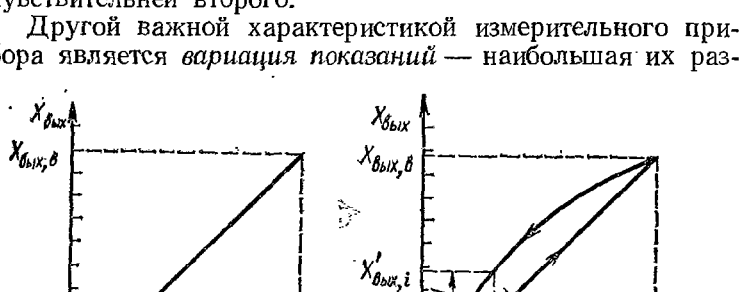


Рис. 9. Статическая характеристика (*а*) и вариация показаний измерительных приборов (*б*)

ность при увеличении и уменьшении измеряемой величины в пределах диапазона измерений (рис. 9, *а*, *б*). Вариация возникает из-за трения в опорах подвижных частей прибора, гистерезиса пружин и упругих элементов. При эксплуатации прибора вариация увеличивается. Наибольшее значение вариации показаний H не должно превышать допустимой погрешности прибора.

гретого пара достигает 545—560 °С, а предельная температура металлических труб пароперегревателя, после которой начинается их разрушение,— 570 °С. При увеличении давления пара выше расчетного и скоплении больших паровых объемов возможны взрыв в котле, повреждение основного оборудования и утечка пара с высокими параметрами в помещение котлотурбинного цеха, при понижении давления пара — образование влажного пара в последних ступенях турбины, что вызывает их эрозию и разрушение.

Современный энергоблок представляет собой целый комплекс теплоэнергетических установок основного (котел, турбина, электрогенератор) и вспомогательного (подогреватели низкого ПНД и высокого ПВД давления, деаэраторы, емкости с добавочной водой, питательные насосы, вентиляторы) оборудования. Существуют вспомогательные производства по подготовке химически обессоленной питательной воды и топливоприготовлению. Эти производства при эксплуатации обмениваются друг с другом материальными и энергетическими потоками, т. е. оказываются взаимосвязанными. В то же время они часто располагаются на значительном расстоянии друг от друга, что затрудняет их согласованную работу.

Работа современного оборудования ТЭС связана с изменением уровня вырабатываемой мощности энергоблока, его пусками из различных состояний и иногда неплановыми и внезапными остановами. Такие условия работы энергетического оборудования зависят от требований энергосистемы, где может возникать дефицит или избыток вырабатываемой мощности. При работе энергоблоков ТЭС в переменных режимах приходится учитывать тепловую инерцию важных теплотехнических параметров и способность энергоблока аккумулировать или отдавать теплоту в переходных режимах. Эти особенности работы оборудования обусловливают ряд требований и ограничений к процессам его управления.

Работой современного котлоагрегата (энергоблока) управляет оператор. Отмеченные ранее особенности эксплуатации котлоагрегатов на ТЭС (их сложность, близость параметров к предельным значениям, удаленность отдельных устройств друг от друга, необходимость управляемости и надежности в работе) являются определяющими в создании разветвленной и работоспособной сети сбора и переработки информации о ходе теплоэнергетических процессов и о состоянии оборудования на ТЭС. Эта сеть создается на базе приборов, автоматически измеряющих теплотехниче-

Для оценки погрешности приборов используется такая обобщенная характеристика, как класс точности. Если пределы допускаемой основной погрешности заданы абсолютной погрешностью ΔX в единицах измеряемой величины, класс точности прибора обозначают «Кл 1» или «Кл 2». В этом случае он носит условный характер и не имеет связи с конкретным значением погрешности прибора. Можно сказать, что чем меньше класс точности прибора, тем он точнее.

Гораздо чаще для нормирования погрешности прибора используют класс точности К, связанный с конкретным значением абсолютной погрешности $\Delta X = \pm K X_N/100$, где X_N — нормированное значение шкалы прибора. Это значение при установлении ΔX принимается равным: верхнему пределу измерений ($X_в$) — для приборов с односторонней шкалой; арифметической сумме верхнего и нижнего пределов измерений $|X_н|+|X_в|$ — для приборов с двусторонней шкалой; разности верхнего и нижнего пределов ($X_в - X_н$) — для приборов с безнулевой шкалой; значению X_N, указанному в паспорте,— для приборов физико-химического анализа веществ, ЦИП.

Класс точности прибора задается любым числом из размерного ряда $(1; 1{,}5; 2{,}0; 2{,}5; 3{,}0; 4{,}0; 5{,}0; 6{,}0)\cdot 10^n$, где $n=1;\ 0;\ -1;\ -2$.

Пример. Ртутный термометр с двусторонней шкалой $-50 \div +50$ °С имеет класс точности 1. Определим пределы абсолютной погрешности показаний $\Delta X = \pm \dfrac{1\cdot(|-50|)+50)\ °\text{C}}{100} = \pm\ 1°\text{C}$.

В настоящее время создание новых приборов связано с унификацией входных и выходных сигналов приборов и преобразователей. Унификация этих сигналов обеспечивает взаимозаменяемость средств измерений, повышает надежность их работы, открывает возможности использования микропроцессоров и информационно-вычислительных машин. Существует Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП), которая строится по блочно-модульному принципу и делится на три ветви, объединяющие приборы с пневматическим, электрическим токовым и электрическим частотным выходным и входным сигналами. Установлены следующие диапазоны изменения унифицированных сигналов: пневматического — 0,02—0,1 МПа, электрического — 0—5 мА (постоянного тока), 1—0—1, 0—2 и 1—3 В (переменного тока частотой 50 Гц); электрического частотного — 1500—2500 и 4000—8000 Гц.

ские параметры. При определении некоторых важных параметров приборы снабжают устройствами сигнализации предельных значений. Вся измерительная информация должна поступать к оператору, который управляет работой котлоагрегата (энергоблока), обеспечивая его надежность и безопасность.

Оснащение современных котлоагрегатов измерительными приборами регламентируется правилами и инструкциями Гостехнадзора и ПТЭ оборудования электрических станций.

Для контроля за работой установок пылеприготовления применяют показывающие приборы для измерения: температуры сушильного воздуха перед мельницей и пылевоздушной смеси за ней; давления воздуха перед мельницей и перепада давлений на ней; температуры пыли и ее уровня в бункере; тока электродвигателей мельниц, вентиляторов мельничного и первичного воздуха, шнековых питателей (тока возбуждения синхронных электродвигателей) и определения положения регулирующих органов (задвижек, клапанов, заслонок).

Пылеприготовительные установки должны быть оборудованы сигнализацией: прекращения подачи топлива к питателям сырого угля; повышения температуры за мельницей; низкого и высокого уровня пыли в бункере.

Для контроля за работой котлов производительностью до 35 т/ч пара применяют показывающие приборы — водоуказательные устройства на барабане и приборы для измерения давления в нем.

Котельные установки производительностью более 35 т/ч пара должны быть оборудованы самопишущими приборами с показывающей шкалой для измерения:

давления свежего пара за пароперегревателем и его расхода в каждом паропроводе;

температуры свежего и вторичного пара за пароперегревателем в каждом паропроводе;

уровня воды в барабане;

расхода питательной воды на котел и по каждому пароводяному тракту прямоточного котла;

температуры питательной воды на входе в котел;

температуры пара за первой пароперегревательной поверхностью (перед первым впрыском);

давления питательной воды на входе в котел до регулирующих органов;

температуры газов за последией поверхностью нагрева котельного агрегата;

содержания O_2 в дымовых газах (в газоходе);

расхода газообразного топлива и мазута (для мазутных и газомазутных котлов) на котел;

температуры мазута на входе в котельную;

температуры металла барабана, встроенных сепараторов, коллекторов пароперегревателя, отдельных точек паропроводов и пароперегревательных поверхностей для котлов с давлением пара 14 МПа и более.

Наряду с основными существуют вспомогательные средства измерений, входящие в комплект измерительной установки. К ним относят, например, термометр для определения температуры газа при измерении его объемного расхода. По показаниям термометра в результаты измерений расхода вводятся поправки.

Кроме отдельных средств измерений применяют информационно-измерительные системы, состоящие из совокупности средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи. Такие системы позволяют не только автоматизировать измерения, но и производить необходимую обработку их результатов по заданным алгоритмам и передачу сигналов для использования в автоматизированных системах управления (АСУ).

§ 4. Эталоны и поверка рабочих средств измерений

Единство измерений достигается точным воспроизведением и хранением установленных единиц физических величин и передачей их размеров применяемым средствам измерений. С этой целью все средства измерений делятся на эталоны, образцовые и рабочие.

Эталоны, обеспечивающие воспроизведение и хранение единиц физических величин, предназначены для передачи их размеров образцовым, а от них рабочим средствам измерений, применяемым в народном хозяйстве. Точность воспроизведения эталоном данной единицы наивысшая. Одиночный эталон массы представляет собой платиноиридиевую гирю в 1 кг, групповой эталон сопротивления 1 Ом — шесть манганиновых сопротивлений, групповой эталон давления — пять грузопоршневых манометров с пределами измерения $0{,}25 \cdot 10^5 \div 600 \cdot 10^5$ Па. Существуют эталоны термопар, термометров сопротивлений и оптических пирометров.

Образцовые средства измерений, представляющие собой меры, измерительные приборы или измерительные преобразователи, предназначены для передачи размеров единиц физических величин от эталонов рабочим мерам и измерительным приборам. Они служат для поверки и градуировки по ним других средств измерений. По точности образцовые средства измерений делятся на 1, 2 и 3-й разряды.

Рабочие средства измерений предназначены для измерений во всех отраслях народного хозяй-

На котельных установках устанавливают также показывающие приборы для измерения:

давления пара в барабане котла;

давления среды до встроенной задвижки;

температуры пара до впрысков и после них, а также среды за отдельными поверхностями нагрева;

уровня воды в барабане;

перепада давлений на диафрагме на линии сброса из встроенных сепараторов;

давления пара за вторичным пароперегревателем;

растопочного расхода питательной воды;

давления мазута или газа после регулирующих клапанов;

изменения прозрачности дымовых газов (для мазутных и газомазутных котлов);

разрежения в верхней части топки;

температуры газов в поворотной камере;

давления первичного воздуха в общей коробке;

расхода воздуха на котел или сопротивления воздухоподогревателя;

температуры пылевоздушной смеси в пылепроводах перед горелками;

тока электродвигателей дымососов, дутьевых вентиляторов, вентиляторов первичного воздуха и питателей пыли;

давления пара, используемого для распыливания мазута и продувки мазутных форсунок;

температуры воздуха до и после воздухоподогревателя;

давления газообразного топлива и мазута перед топкой до регулирующих клапанов;

давления газа в камере каждой газовой горелки;

разрежения перед конвективной шахтой и дымососами, перед и за воздухоподогревателем;

температуры газов перед каждой ступенью воздухоподогревателя;

давления воздуха за дутьевыми вентиляторами и воздухоподогревателями;

давления первичного и вторичного воздуха перед каждой горелкой;

расхода первичного воздуха на каждую горелку;

температуры металла барабана, выходных коллекторов пароперегревателей и отдельных змеевиков пароперегревателя котлов давлением до 140 МПа;

температуры подшипников.

Кроме того, котельные установки оборудуют сигнализацией: повышения давления среды перед встроенной задвижкой; понижения давления пара перед встроенной задвижкой, газа или мазута за регулирующими клапанами, первичного воздуха; повышения температуры — свежего и вторичного перегретого пара, среды за первой пароперегревательной поверхностью, подшипников дымососов, вентиляторов, мельниц; понижения температуры свежего и вторичного перегретого пара, мазута; прекращения подачи масла на подшипники дымососов, вентиляторов, мельниц; понижения расхода питательной воды и вторичного перегретого пара; повышения солесодержания свежего пара; забивания пылепроводов; остановки электродвигателя механизма непрерывного шлакоудаления котла; недопустимого изменения уровня воды в барабане котла.

ства. По точности эти средства разделяют на лабораторные (повышенной точности) и технические.

Поверка — определение метрологической службой погрешностей средства измерений и установление его пригодности к измерению. Если погрешность средства измерений выше допустимой, оно для дальнейших измерений непригодно. Поверки бывают первичными и периодическими. Первичную поверку выполняют при выпуске средства измерений в обращение из производства или ремонта, а периодическую — через определенные промежутки времени при его эксплуатации или хранении.

Существуют следующие методы поверки: непосредственное сличение поверяемого средства измерения с образцовым; прямое измерение поверяемым прибором величины, воспроизводимой образцовой мерой; независимая поверка, т. е. измерение поверяемым и образцовым приборами физической величины; измерения величин, воспроизводимых мерой или измерительным прибором, подвергаемым поверке.

Поверка осуществляется метрологическими службами Государственного комитета СССР по стандартизации в контрольных лабораториях.

§ 5. Погрешности средств измерений

Все погрешности по характеру проявления в результате измерения делятся на систематические, случайные и грубые (ГОСТ 8.009—84).

Основным видом погрешности в теплотехнических измерениях является систематическая погрешность, которая остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины. Эту погрешность устраняют либо введением поправок, либо совершенствованием процесса измерения. Поправка, равная систематической погрешности по величине и обратная по знаку, прибавляется к полученному результату измерения. Поправки задаются в виде формул, таблиц или графиков. Например, для грузопоршневых манометров вводят поправки на ускорение свободного падения $C_1 = p_{изм}(g/9{,}8066 - 1)$ и на отклонение температуры $C_2 = p_{изм}[(\alpha_1 + \alpha_2)(t° - 20°) - \alpha_3 t°]$, где $p_{изм}$ — измеренное давление; g — ускорение свободного падения; α_1, α_2 и α_3 — коэффициенты линейного термического расширения поршня, цилиндра и рабочей жидкости; $t°$ — текущая температура.

Систематические погрешности разделяют на инструмен-

§ 53. Функции и принципы организации теплотехнического контроля

Управление работой котлоагрегата основано на использовании разветвленной сети сбора и переработки данных о ходе технологических процессов, которая является первой ступенью комплексной автоматизации производства. Состояние энергоблока оператор определяет по показаниям измерительной системы:

1) оперативным данным о параметрах оборудования ТЭС в различных режимах работы, их отклонениям от номинальных значений;

2) расчетным и отчетным данным, необходимым для контроля и диагностики состояния оборудования ТЭС, а также установления причин его ненормальной работы и аварий;

3) технико-экономическим показателям, оценивающим качество работы оборудования;

4) отклонениям от номинальных значений с целью управления теплоэнергетическими процессами на ТЭС (устройства регулирования и защиты).

Получение этой информации предполагает создание системы сбора и передачи измерительных сигналов в единое место к оператору, что позволяет применять системный подход к выбору средств измерений, а весь комплекс приборов, устанавливаемых на котле, рассматривать как систему теплотехнического контроля. Чаще ее называют информационно-измерительной системой (ИИС), в которой по степени важности выделяют четыре группы параметров.

К *первой группе* относят наиболее ответственные параметры, характеризующие ход технологического процесса и безопасность работы агрегатов (давление, расход пара и питательной воды, уровень воды в барабане котла, температуру пара перед турбиной). Постоянно включенные приборы контролируют эти параметры и сигнализируют об их отклонениях от нормы. Вторичные приборы устанавливают на блочном щите управления БЩУ для получения оператором измерительной информации. Для параметров этой группы характерен индивидуальный контроль.

Ко *второй группе* относят параметры, характеризующие ход технологического процесса и его качественные показатели (температуру уходящих газов, питательной воды, содержание кислорода, расход воды на впрыски). Знание этих параметров необходимо оператору для контроля технологического процесса, управления режимом работы агрегатов. Сигнализация их отклонений не осуществляется, однако

тальные, метода измерений, установки прибора, считывания.

Под *инструментальной* понимается погрешность применяемых средств измерений, вызванная несовершенством их изготовления. Она возникает из-за некачественной сборки частей деталей, деформаций упругих элементов, износа трущихся частей при эксплуатации и т. д. К этим погрешностям относят и динамические ошибки, возникающие при измерении меняющихся величин. Инерционность средства измерений не позволяет точно определить данную величину.

Погрешности метода измерений связаны с ошибочностью или недостаточностью разработки теории метода измерений или с упрощениями, допущенными при проведении измерений. Эти погрешности могут возникать также при экстраполяции величины, измеренной на ограниченной части, на весь объект (при взятии для анализа пробы вещества, при измерении диаметра детали в одном сечении) и из-за влияния измерительной аппаратуры на измеряемые свойства объекта (при измерении давления вследствие теплового расширения в импульсных линиях жидкостных приборов давления).

Погрешность установки прибора может быть вызвана: неправильным выбором места измерения; влиянием неблагоприятных внешних условий (вибрации, температуры, влажности); удаленностью объекта измерения от приборов обработки измерительных сигналов; небрежной установкой прибора (например, не по отвесу или уровню).

Погрешности считывания, возникающие при неавтоматизированных измерениях, объясняются индивидуальными особенностями наблюдателя. Они возникают при неправильном считывании показаний прибора (параллакс показаний, их интерполяция).

При технических измерениях ряд составляющих погрешностей (установки прибора, считывания) можно устранить, а другие определить в результате поверки более точными приборами. Погрешности, которые нельзя устранить, нормируются и указываются в паспорте средства измерений.

§ 6. Метрологические характеристики средств измерений

При оценке свойств средств измерений большое значение имеют их метрологические характеристики. Они являются составной частью исходной информации, которая

многие из них, являющиеся качественными показателями технологического процесса, регистрируются и периодически контролируются обегающей системой опроса.

К *третьей группе* относят параметры, которые при нахождении в допустимых границах не влияют на ход технологического процесса (температура подшипников, давление масла в системе смазки вспомогательных агрегатов). Эти параметры контролируют приборами, устанавливаемыми по месту измерения (местный измерительный щит), а их

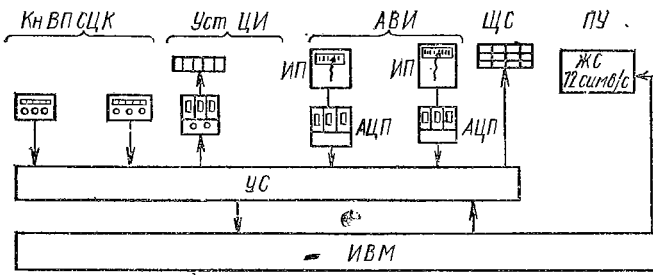


Рис. 70. Функциональная схема системы централизованного контроля:

КнВП СЦК — кнопки набора программы в *СЦК*, *Уст ЦИ* — устройства цифровой индикации с вызовом, *АВИ* — аналоговый вызов измерения, *ЩС* — щиты сигнализации, *ПУ* — пульт управления для диалога (с клавиатурой), *ЖС* — журнал событий, *УС* — устройства согласования, *ИП* — измерительный преобразователь

отклонения от нормы — устройствами сигнализации, установленными на БЩУ.

И наконец, к *четвертой группе* относят параметры, которые необходимы для контроля при наладке котлов после ремонта или при существенных изменениях режима работы (изменение вида топлива). Приборы этой группы, размещаемые по месту измерения, в период их нормальной работы оператором не используются.

Необходимое число измеряемых параметров современного котельного агрегата ТЭС достигает 1000 и более. Количественный рост измеряемых параметров в системе индивидуального контроля приводит к увеличению площади БЩУ, занятых вторичными приборами, затрудняет восприятие информации оператором, поэтому большинство параметров измеряют с помощью системы централизованного контроля СЦК (рис. 70). В этой системе аналоговые унифицированные сигналы от первичных или нормирую-

необходима: для определения результата измерения и оценки инструментальной погрешности средств измерений; для оптимального выбора средств измерений; при поверке средств измерений на соответствие установленным в паспорте характеристикам; для расчета метрологических характеристик информационно-измерительных систем, состоящих из средств измерений с нормированными метрологическими характеристиками.

В номенклатуру метрологических характеристик входят:

1) характеристики средств измерений, определяющие результаты измерений;

2) характеристики основной (систематической) погрешности средств измерений;

3) характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам;

4) динамические характеристики средств измерений;

5) характеристики средств измерений, определяющие дополнительную погрешность из-за взаимодействия с внешним объектом (например, с объектом измерения, измерительным преобразователем, см. рис. 1).

Характеристиками первой группы являются: функция преобразования измерительного преобразователя и прибора с неименованной шкалой или со шкалой, отградуированной в единицах, отличных от единиц входной величины $f(X)$; значения однозначной или многозначной меры $X_{\text{ном}}$; цена деления шкалы аналогового прибора или многозначной меры; вид выходного кода, число его разрядов, цена единицы наименьшего разряда кода средств измерений, предназначенных для выдачи результатов в цифровом виде.

Перечень нормируемых характеристик основной погрешности средств измерений утверждается ГОСТ 8.009—84. В соответствии с ГОСТом для систематической погрешности устанавливаются значения абсолютных или приведенных погрешностей.

Абсолютная погрешность выражается:

одним значением $\Delta = X - X_{\text{д}} = \pm a$, где Δ — предел допускаемой погрешности в единицах измеряемой величины; X — показания прибора; $X_{\text{д}}$ — действительное значение измеряемой величины; a — постоянное число;

в виде зависимости от значения показания или сигнала $\Delta = \pm (C + bX)$, где b — коэффициент пропорциональности;

в виде таблицы значений Δ от X.

Приведенная погрешность $\delta = \pm (\Delta / X_N) \cdot 100\%$, где δ —

щих преобразователей поступают на коммутатор, который последовательно во времени подает их либо на измерительные потенциометры *ИП*, либо на *АЦП*. Затем дискретная информация поступает на цифровые индикаторы *ЦИ* и печатающие устройства *ПУ*.

В системе централизованного контроля производится периодический опрос измеряемых параметров. При выходе из области допустимых отклонений параметры фиксируются *ПУ* и включается сигнализация. Оператор, оповещенный сигнализацией, может вызвать параметр на многошкальный потенциометр или цифровой индикатор. Таким образом в СЦК отсутствует большое количество показывающих, самопишущих и сигнализирующих вторичных приборов, что существенно облегчает условия работы оператора.

Информационная вычислительная машина ИВМ в системе централизованного контроля рассчитывает ТЭП и обрабатывает измерительную информацию с целью диагностики состояния теплоэнергетического оборудования (выполняет контроль за температурными напряжениями стенок барабана, состоянием проточной части турбины, отложениями на парогенерирующих поверхностях нагрева и теплообменных трубках конденсатора) и регистрирует аварийные ситуации.

§ 54. Выбор измерительных приборов для системы теплотехнического контроля котлоагрегатов

Приборы для СЦК выбирают исходя из требований надежности, точности и стоимости в зависимости от назначения определяемых параметров.

Надежность — основное требование, предъявляемое к приборам оперативного контроля параметров в условиях длительной эксплуатации. Наиболее надежными измерителями температуры являются термоэлектрические термометры. Термометры сопротивления надежно работают в тех местах, где нет вибраций и разрушений защитного чехла. Кроме того, их преимущественно используют в вычислительных измерительных приборах (тепломерах), где они могут выполнять функции множительно-делительных и функциональных элементов. Среди приборов измерения давления, расхода, уровня лучшими по надежности являются манометры и дифманометры с дифференциально-трансформаторными преобразователями. Среди вторичных приборов наибольшей надежностью отличаются приборы

предел допускаемой приведенной погрешности, %; X_N — нормированное значение. Для этого способа нормирования погрешности предел δ совпадает с классом точности K средства измерений. В технических измерениях, как правило, применяют средства измерений с нормированным классом точности.

На любой результат измерения действуют кроме основной другие физические величины, называемые влияющими. Если при измерениях их значения находятся в пределах узкой области, условия измерений называют нормальными. В качестве нормальной области изменений влияющих величин принимают следующие: температура воздуха (20±5) °С, барометрическое давление (101,325±±3,3) кПа [(760±25) мм рт. ст], напряжение питания (220±5) В и т. д.

При эксплуатации средств измерений на ТЭС влияющие величины меняются в более широких диапазонах, называемых *рабочими условиями*. Под рабочими условиями понимают следующие: температура окружающего воздуха — от —50 до +50 °С, его относительная влажность — от 30 до 80%, изменение напряжения питания — от 185 до 245 В и т. д. Для этих условий нормируется дополнительная погрешность средств измерений, которая входит в характеристики третьей группы. Обычно задается функциональная зависимость $\Delta_{доп}$ от изменения влияющих величин $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_n$ в рабочей области (функция влияния). В частности, влияние температуры задается линейной зависимостью $\delta_{доп} = \pm\alpha_{пр}\Delta t°$, где $\Delta t°$ — разность реальной и нормальной температур; $\alpha_{пр}$ — температурный коэффициент, % на 1 °С. При заданной функции влияния отдельно по каждой величине ε_i общая дополнительная погрешность $\delta_{доп}$ получается как сумма отдельных $\delta_{доп,\, i}$.

В рабочих условиях на средства измерений кроме влияющих величин могут воздействовать внешние факторы, ухудшающие и нарушающие их нормальную работу (пыль, вибрация, влага), поэтому их выполняют герметическими, пылезащитными, виброустойчивыми и т. д.

Рассмотренные выше характеристики погрешностей касались измерений постоянных (статических) или медленно меняющихся физических величин. На практике измеряемая величина может изменяться с большой скоростью, при этом в результатах измерения возникают погрешности еще одного вида, называемые *динамическими*. Пусть измеряемая величина задается функцией от времени $X(t)$, а выходная величина — функцией $Y(t)$. Допустим, что

индивидуального контроля, измерительный канал которых содержит минимальное число элементов (первичный прибор или преобразователь, линию связи, вторичный прибор). При контроле одним вторичным прибором с помощью переключателя нескольких однородных параметров надежность измерений снижается.

В системе централизованного контроля вторичные приборы применяют вместе с нормирующими преобразователями. Регистрация и дистанционная передача сигналов от первичного преобразователя осуществляется приборами КСД, а от нормирующих преобразователей — КСП. При увеличении элементов в измерительной цепи надежность канала измерения параметров снижается, поэтому для ее повышения при измерении важных параметров используют дополнительные меры (дублирование каналов измерения, резервирование измерительных устройств).

Точность — определяющий критерий при выборе приборов, по измерительным сигналам которых вычисляют ТЭП, поскольку эти показатели и другие расчетные величины являются косвенными и их погрешность зависит от погрешностей измерения исходных теплотехнических величин и расчетных соотношений между ними.

На погрешность кпд и экономические показатели котла прежде всего влияют погрешности измерения расхода топлива, пара, затем погрешности измерения температуры и давления.

Для измерения расхода жидкого и газообразного топлива служат самые точные приборы — тахометрические расходомеры. Расход воды и пара может быть измерен с помощью дифманометров расходомеров, среди которых наиболее точными являются «Сапфир-22ДР».

По сравнению с приборами индивидуального контроля погрешность измерительной информации в СЦК за счет введения нормирующих преобразователей НП, АЦП, коммутаторов К возрастает на 15—20%. При снижении погрешности первичного преобразователя ПП доля этой дополнительной погрешности увеличивается. Из-за введения в измерительный канал дополнительных элементов значительно ухудшается надежность средств измерений. В последнее время в СЦК стали применять локальные информационно-вычислительные устройства с микропроцессорами, для которых целесообразно использовать измерительные приборы класса 0,5 с преобразователями измерительных сигналов в унифицированные сигналы постоянного тока.

статическая погрешность отсутствует, тогда динамическая погрешность $\Delta_{дин}(t)=Y(t)-Y_{ид}(t)$, где $Y_{ид}(t)=KX(t)$ — выходная величина идеального прибора; K — коэффициент передачи этого прибора.

На рис. 10 приведены графики, показывающие отличие реальных $Y(t)$ и идеальных $Y_{ид}(t)$ процессов; при ступенчатом изменении $X(t)$ величина $Y(t)$ изменяется плавно, а кривая называется переходным процессом $h(t)$.

Для оценки динамических погрешностей аналоговых средств измерений нормируются либо полные динами-

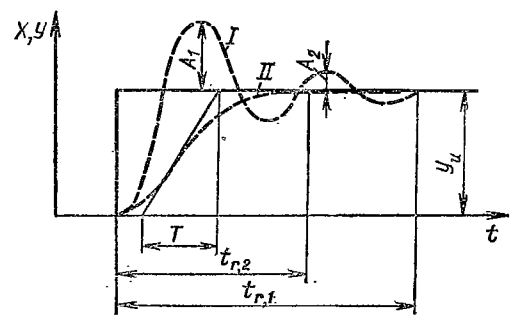


Рис. 10. Переходные процессы и их параметры для приборов с различными динамическими свойствами:
I — колебательный процесс, *II* — апериодический (неколебательный) процесс

ческие характеристики $[h(t)]$, либо их параметры (постоянная времени T, время реакции t_r, коэффициент затухания $v=1-A_2/A_1$).

Для цифровых средств измерений (АЦП, ЦИП, ЦАП) нормируются: время реакции t_r, погрешность датирования отсчета $t_д$, максимальная частота измерений ω_{max}.

Для определения динамической погрешности $\Delta_{дин}(t)$ могут быть использованы только полные динамические характеристики. Нормирование параметров этих характеристик позволяет правильно выбрать средства измерений как для технологического контроля, сигнализации и защиты, так и для регулирования.

Наконец, характеристики пятой группы касаются средств измерений, работа которых связана с обменом энергии между ними и подключенными к их входу или выходу объектами. При чрезмерном потреблении энергии средством измерений от объекта измерения могут появиться погрешности $\Delta_{вз}$ (например, при измерении в пробирке темпе-

§ 55. Установка приборов и устройств информации на БЩУ

На щитах и пультах управления размещают сотни контрольных приборов, сигнальных устройств регуляторов, устройств управления, представляющих оператору информацию о состоянии оборудования и позволяющих управлять им.

Работа оператора сложна и имеет ряд специфических особенностей:

при управлении оператор одновременно решает различные задачи — контролирует ход и изменения технологического процесса, определяет причины появления этих изменений и принимает решения по их устранению, воздействуя на органы управления энергоблоком, а также записывает показания приборов и ведет оперативную связь;

в процессе восприятия и переработки информации оператор должен воспроизводить в памяти схему технологического процесса, основные агрегаты и узлы, их технологическую последовательность, взаимосвязь и назначение;

оператор удален от управляемого объекта и информацию получает по каналам контроля; воздействие на объект осуществляется дистанционным управлением;

почти вся измерительная информация об энергоблоке поступает к оператору через органы зрения;

в аварийных ситуациях при дефиците времени от оператора энергоблока требуется быстрота реакции, хотя при нормальных режимах он работает в спокойной обстановке, что накладывает определенное влияние на его психофизиологическое состояние.

В последнее время для управления на ТЭС применяют автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), которые включают человека (оператора) и ЭВМ для управления энергоблоком.

Нетрудно заметить, что оператор находится в тесной связи с системой управления энергоблоком и является ее важной составной частью. Эффективность его работы зависит от профессионального мастерства, совершенства теплоэнергетического оборудования, принятой системы автоматизации и взаимной приспособленности ее и оператора как звеньев единой системы управления, поэтому организация представления информации оператору должна соответствовать закономерностям восприятия и дальнейшей переработки ее человеком. Для выполнения этого требования необходимо:

ратуры среды с помощью термометра она может измениться из-за отбора им теплоты). В электрических средствах измерений для снижения погрешности $\Delta_{вв}$ входное сопротивление должно быть наибольшим, а выходное — наименьшим.

Для определения характеристик инструментальной погрешности измерений, производимых с помощью любого средства измерений, необходимо найти суммарную погрешность $\Delta_{0,\Sigma} = \Delta_0 + \sum_{i=1}^{n} \Delta_{д,i} + \Delta_{дин} + \Delta_{вз}$.

В технических измерениях на ТЭС, когда $\Delta_{дин} = 0$, а погрешность $\Delta_{вз}$ можно не учитывать, абсолютная предельная погрешность измерения величины $\Delta_{0,\Sigma} = \Delta_0 + \Delta_д$, где Δ_0 — основная абсолютная погрешность прибора ($\Delta_0 = \pm \delta X_N/100 = \pm KX_N/100$), $\Delta_д$ — дополнительная абсолютная погрешность прибора $\left(\Delta_д = \pm \sum_{i=1}^{n} \delta_i X_N/100\right)$.

§ 7. Метрологические характеристики информационно-измерительных систем

В технике часто применяют измерительные цепи или системы, состоящие из нескольких средств измерений. В таких системах необходимо оценивать погрешность. В целом измерительная система может быть представлена в виде последовательной цепи, состоящей из первичного измерительного прибора (датчика), преобразователя, линии связи, вторичного измерительного прибора или аналого-цифрового преобразователя перед входом в ЦВМ. Измерительные системы преобразуют входной сигнал в выходной с какой-то погрешностью $\Delta_с$, которую можно представить как сумму основной и дополнительной погрешностей $\Delta_с = \Delta_{0,с} + \Delta_{д,с}$. Основная и дополнительная погрешности определяются соотношениями $\Delta_{0,с} = \sqrt{\Delta_{0,1}^2 + \Delta_{0,2}^2 + \ldots + \Delta_{0,n}^2}$ и $\Delta_{д,с} = \sqrt{\Delta_{д,1}^2 + \Delta_{д,2}^2 + \ldots + \Delta_{д,n}^2}$, где $\Delta_{0,n}$ и $\Delta_{д,n}$ — предельные основная и дополнительная погрешности каждого из средств измерений, входящего в систему.

Этот способ оценки погрешности справедлив, если погрешности отдельных средств измерений независимы друг от друга.

При измерении теплоэнергетических параметров с помощью рабочих средств измерений следует учитывать влияние на показания различных величин и факторов. Не-

обходимо исключить всякие переходные режимы, связанные с включением приборов, изменением нагрузки, нестабильностью работы элементов конструкции, и добиться установившегося режима работы средств измерений, для чего требуется некоторое время, которое приводится в специальной инструкции.

Ковтрольные вопросы

1. Что такое метрология, и для чего она предназначена?
2. Какие основные единицы физических величин применяют в системе СИ?
3. Из каких преобразователей может состоять измерительная цепь средств измерений?
4. Какие виды средств измерений вы знаете?
5. Как определяют погрешности при измерениях?
6. Как производят отсчет показаний в аналоговых и цифровых приборах?
7. Что такое чувствительность и вариация прибора?
8. Какие виды основных погрешностей вы знаете?
9. Как определяют погрешности сложных информационно-измерительных систем?

ГЛАВА II

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР

§ 8. Общие сведения

Температура — один из важнейших параметров технологических процессов на ТЭС. Измеряют температуру питательной воды, вырабатываемого пара, сжигаемого мазута, газа, нагретого воздуха, дымовых газов, температуру в топке котла, поверхностей нагрева и подшипников.

Температура зависит от средней кинетической энергии молекул и служит параметром теплового состояния любого вещества. При этом объект с большей температурой передает тепловую энергию объекту с меньшей температурой так, что происходит их выравнивание.

Приборы для измерения температуры появились еще в XVII в. Были предложены различные температурные шкалы: Фаренгейта, Реомюра, Цельсия и др. В основе построения этих шкал лежит выбор двух опорных (реперных) температур, характеризующих фазовое равновесие чистого вещества при его переходе из одного агрегатного состояния в другое.

централизовать на БЩУ контроль всех технологических процессов, влияющих на безопасность и экономичность работы оборудования;

обеспечить оператору широкий обзор приборов, необходимых для оперативного управления;

максимально сократить операции, выполняемые оператором для получения необходимой информации о состоянии оборудования (максимальная автоматизация и упрощение операций контроля);

обеспечить возможность определения оператором скоростей изменения параметров;

создать в пунктах управления энергоблоком для успешной работы оператора благоприятные условия, отвечающие не только техническим нормам, но и требованиям инженерной психологии и технической эстетики.

От соблюдения этих требований во многом зависит работоспособность, надежность, точность и быстрота действий оператора.

Рассмотрим рекомендации и принятые решения по оборудованию пунктов управления работой энергоблока ТЭС. Для размещения приборов на БЩУ необходимо решить вопрос компоновки систем пункта управления.

Проанализировав работу оператора, пункт управления разделили на функциональные зоны. Первой является зона оперативного контроля и управления, где устанавливается пульт с аппаратурой управления, приборами вызова основных технологических параметров. Вторая зона, в которой компонуются регистрирующие приборы, вычислительные устройства и счетчики, предназначена для периодического анализа и выработки параметров оптимальных режимов оборудования. Следующая зона (зона общей информации) оборудуется на БЩУ измерительными приборами, мнемосхемой, световой и звуковой сигнализацией. Кроме того, должна быть и зона отдыха. Площадь помещения пункта управления определяется как сумма площадей всех функциональных зон, при этом длина периметра стен пункта управления зависит в основном от габаритов и конструкции БЩУ.

Удачным решением оказалось такое, когда БЩУ размещается вдоль одной из стен помещения, а место оператора находится в вершине угла (не более 120°), образованного линиями от крайних точек щита. Расстояние от БЩУ до стенки помещения должно быть не менее 800 мм, а до места постоянного нахождения — в пределах 5 м. Обзор приборов с мелкой шкалой и ножевидной стрелкой происходит с рас-

стояния 1—2 м, с хорошо видимой шкалой — 2—4 м. Лучше всего показания прибора видны при угле обзора 30—40°. В вертикальной плоскости БЩУ приборы устанавливают в зоне, ограниченной расстояниями 1,2—1,6 м от его основания. В пункте управления должны быть созданы комфортные условия: нормальные температура, влажность, освещенность и цвет помещения, отсутствие шума и вибраций.

Компоновку приборов на БЩУ выполняют с учетом следующих рекомендаций:

приборы, измеряющие наиболее важные и часто используемые параметры энергоблока, должны размещаться в пределах оптимальной зоны видимости оператора;

приборы, измеряющие параметры одного и того же объекта по функциональному признаку, размещаются в виде группы, зрительно отделенной от других;

при размещении приборов внутри функциональных групп придерживаются определенной последовательности, в которой оператор считывает показания, т. е. устанавливают их слева направо и сверху вниз (приборы, измеряющие одинаковые параметры, располагают вертикально, а измеряющие различные параметры одного процесса — горизонтально).

Рекомендуется применять приборы стрелочного типа с одинаковыми шкалой и способом ее оцифровки. На шкале следует отмечать пределы различных режимов работы — «норма», «отклонение», «авария». Все надписи и цифры в приборах должны иметь простую конфигурацию и располагаться вертикально. Не рекомендуется применять приборы с подвижными, выпуклыми и неравномерными шкалами. Цифровые приборы используют, когда оператору необходима точная количественная информация о параметрах без сопоставления с другими или поиска их отклонений.

Надписи на сигнальных световых табло, устанавливаемых на БЩУ, должны читаться при включенной и выключенной сигнальной подсветке. Текст на них должен быть кратким и понятным. Для аварийных и предупредительных сигналов используют мигающий свет с частотой мигания 3—8 Гц.

Кроме приборов в верхней части БЩУ устанавливают мнемосхемы, которые представляют собой графическое изображение функциональной схемы энергоблока в целом. Мнемосхема должна четко делить общую схему на функциональные схемы отдельных агрегатов или объектов, по-

Интервал между опорными температурами делится на определенное число отметок с одинаковой длиной деления, которые и образуют температурную шкалу. Цену деления такой шкалы называют *градусом*. В частности, для стоградусной шкалы Цельсия в качестве реперных температур приняты температуры плавления льда и кипения воды при нормальном атмосферном давлении.

В дальнейшем выяснилось, что для одинаковых температурных шкал приборов, использующих различные физические вещества, получались разные значения температуры. Объяснялось это тем, что термометрические свойства различных веществ по-разному изменяются с температурой.

В 1849 г. Кельвин предложил термодинамическую шкалу, не зависящую от термометрических свойств веществ. В основу ее построения положен термодинамический обратимый цикл Карно $Q_1/Q_2=T_1/T_2$, где Q_1 — полученная теплота при абсолютной температуре T_1; Q_2 — отданная теплота при абсолютной температуре T_2.

Термодинамическая температурная шкала явилась исходной при построении температурных шкал, не зависящих от свойств термометрического вещества. Ее единицей служит градус Кельвина (К) — 1/273,16 часть термодинамической температуры равновесия между твердой, жидкой и газообразной фазами воды (тройная точка воды).

Соотношение между температурой t, выраженной в градусах Цельсия, и абсолютной температурой T определяется формулой $t=T-273{,}16°$. Однако для практического измерения температуры термодинамическая шкала неудобна, поскольку необходимо использовать громоздкие газовые термометры с введением для каждого значения температуры различных поправок. Поэтому для воспроизведения температур от 13,81 до 6300 К в 1968 г. была принята Международная практическая температурная шкала, созданная на основе состояний фазового равновесия ряда чистых веществ (водорода, неона, кислорода, воды, цинка, серебра, золота). Этим состояниям веществ (их выбрано одиннадцать) соответствует постоянное значение температуры по термодинамической шкале. Значения температур между постоянными температурами состояний равновесия определяют по интерполяционным формулам с помощью эталонных средств измерений. В качестве таких средств измерений для температур от 13,81 до 903,89 К (630,74 °С) используют термометр сопротивления из платиновой проволоки, для температур от 903,89 до 1337,52 К

(1064,3 °С) — платинородий-платиновый термоэлектрический термометр, от 1337,58 до 6300 К — монохроматический пирометр излучения.

§ 9. Средства измерений температуры в теплоэнергетике

В настоящее время в промышленности применяют десятки различных способов измерения температуры. Средство измерения температуры, предназначенное для выработки сигнала в форме, удобной для восприятия наблюдателем, автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления, называется *термометром*.

Серийные средства измерений температуры, применяемые на ТЭС, в зависимости от принципа измерения приведены в табл. 3.

Таблица 3. **Пределы измерения температур различными термометрами**

Средство измерения	Пределы измерения, °С	
	нижний	верхний
Термометры расширения:		
жидкостные стеклянные	—200	750
манометрические	—200	1000
дилатометрические и биметаллические	0	400
Термоэлектрические термометры	—200	2200
Термометры сопротивления:		
металлические	—260	1100
полупроводниковые	—272	600
Пирометры:		
квазимонохроматические	700	6000
полного излучения	—50	3500

Термометры расширения построены на свойстве тел изменять под действием температуры свой объем или длину, термоэлектрические термометры — на свойстве разнородных металлов и сплавов образовывать в паре (спае) термоэдс, зависящую от температуры спая, а термометры сопротивления — на свойстве тел изменять в зависимости от нагрева электрическое сопротивление.

казывать связи и характер взаимодействия энергоблока с внешними потребителями, обеспечивать световую сигнализацию состояния важных технологических параметров («норма» и «отклонение») и агрегатов («включен» и «отключен»), обеспечивать нахождение резервов для локализации аварий. Наиболее часто применяют мнемосхемы, в которых измерительная информация выдается в аналого-дискретной форме. По технологии изготовления мнемосхемы на БЩУ относятся к рисованным (нанесенным фотоспособом).

В последнее время получают распространение электронно-лучевые индикаторы (дисплеи), на экран которых оператор вызывает отдельные агрегаты или участки технологической схемы энергоблока с нанесенными цифровыми значениями параметров. В отличие от постоянных мнемосхем внимание оператора на дисплеях концентрируется на опасном участке объекта с динамическим изменением параметров, что позволяет быстрее и с меньшими потерями устранить возможную аварию.

§ 56. Развитие методов и средств теплотехнического контроля

Ранее уже говорилось о важности внедрения АСУТП в энергетике. Такие системы позволяют автоматизировать сбор, обработку и выдачу информации оператору. Для мощных энергоблоков ТЭС в настоящее время серийно используются информационно-вычислительные машины (ИВ-500, «Комплекс» и т. д.). Вместе с машинами в современную СЦК входит ряд индивидуальных приборов, в том числе и многоточечных, т. е. она состоит из устройств непрерывного и дискретного действия.

Информационно-вычислительные машины выполняют следующие действия: измерение и индикация величин по вызову оператора; автоматический контроль и сигнализация параметров; периодическая регистрация основных параметров, а также регистрация по вызову; регистрация параметров, отклонившихся от нормы; определение различных показателей и величин с выдачей результатов оператору.

На ТЭС широко применяют в составе СЦК информационно-вычислительную машину ИВ-500. В сети централизованного контроля вместе с ИВ-500 необходимо использовать ряд индивидуальных приборов, измеряющих важнейшие параметры.

Структурная схема машины ИВ-500 показана на рис. 71.

Особое место занимают средства измерений температуры по тепловому электромагнитному излучению, называемые пирометрами. Пирометры служат для бесконтактного измерения температуры.

§ 10. Жидкостные термометры расширения

Физическое свойство веществ изменять свои размеры в зависимости от температуры широко используется для ее измерения. На этом принципе основано устройство жидкостных стеклянных и дилатометрических термометров.

Жидкостные стеклянные термометры являются показывающими приборами, располагаемыми по месту измерения. Принцип действия их основан на тепловом расширении жидкости в стеклянном резервуаре в зависимости от измеряемой температуры. В качестве рабочих веществ используются ртуть и органические вещества — толуол, этиловый спирт, керосин и т. д.

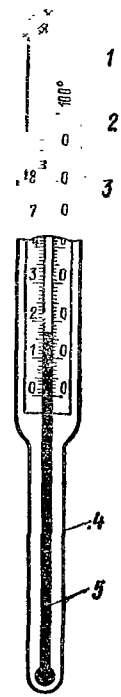


Рис. 11. Стеклянный жидкостный термометр

Стеклянный жидкостный термометр (рис. 11) состоит из резервуара *4* с рабочей жидкостью и припаянного, закрытого с противоположного конца стеклянного капилляра *5*. Вдоль капилляра расположена шкала *3*, на которой нанесены цифровые отметки температуры в градусах Цельсия. За верхней отметкой шкалы имеется запасной объем капилляра *1*, заполненный инертным газом под давлением. Этот объем предохраняет прибор от повреждений при перегреве. Все указанные детали термометра заключены в стеклянную защитную оболочку *2*.

Температуру измеряемой среды, в которую помещается резервуар и часть капилляра стеклянного термометра, определяют по изменению объема термометрической жидкости, отсчитываемому по положению уровня жидкости в капилляре. Изменение в капилляре уровня жидкости при нагреве резервуара (от температуры t_1° до t_2°) $\Delta h = 1{,}27\,[V_1(\alpha_ж - \alpha_c)(t_2^\circ - t_1^\circ)]/d^2$, где V_1 — объем жидкости при температуре t_1°, мм³; $\alpha_ж$ и α_c — средние коэффициенты температурного расширения жидкости и стекла, $^\circ C^{-1}$; d — внутренний диаметр капилляра, мм.

Измерительные преобразователи теплоэнергетических величин группами по 40 единиц соединяют с устройствами коммутации *УК* (их 12), в которых находятся групповые нормирующие преобразователи. Далее к каждому *УК* подсоединяют по два многошкальных 20-точечных показывающих прибора *ППМ* (автоматические потенциометры с пределом измерений 10 мВ) для измерений по вызову. Приборы *ППМ* работают независимо от остальных устройств ИВ-500. Унифицированные сигналы постоянного тока поступают от *УК* в устройство управления и преобразования *УУП*, откуда в цифровой форме выдаются по вызову на цифровые

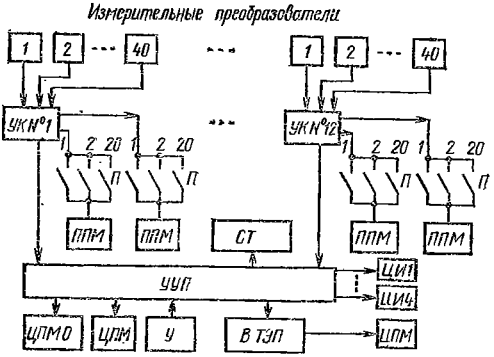


Рис. 71. Схема информационной вычислительной машины ИВ-500

индикаторы *ЦИ* (их четыре), вычислитель технико-экономических показателей (ВТЭП), в сигнальные табло *СТ* отклонений параметров от уставок *У* и на цифропечатающее устройство отклонений *ЦОМО* и устройство периодической печати параметров или по вызову *ЦПМ*. Устройства коммутации *УК* устанавливают в местах расположения контролируемого оборудования.

Информационная вычислительная машина ИВМ-500 состоит из щита с индивидуальными приборами КСП2 и пульта, на котором установлены приборы вызова *ППМ* и цифровые индикаторы (слева) с клавишным переключателем вызова. Вычислитель *ВТЭП*, цифропечатающие устройства и пульт *УУП* смонтированы за панелями щита. К этой машине присоединяют термоэлектрические термометры, термометры сопротивления, приборы для измерения давления, расхода, уровня с выходным сигналом переменного и постоянного тока. Заданное время цикла коммутации от 5 до

Чем больше резервуар и меньше внутреннее сечение капилляра, тем заметнее изменение высоты столбика жидкости, т. е. тем более чувствителен термометр и меньше цена деления шкалы. Поскольку в термометре одновременно с расширением жидкости происходит расширение стеклянных резервуара и капилляра, разность $\alpha_в = \alpha_ж - \alpha_с$ называется коэффициентом видимого расширения жидкости в стекле. Некоторые термометрические жидкости и их характеристики приведены в табл. 4.

Таблица 4. **Термометрические жидкости**

Жидкость	Пределы измерения, °С		Средний коэффициент теплового расширения, $°С^{-1}$	
	нижний	верхний	действительный	видимый
Ртуть	—35	650	0,00018	0,00016
Толуол	—90	200	0,00109	0,00107
Этиловый спирт	—80	70	0,00105	0,00103
Керосин	—60	300	0,00095	0,00093
Петролейный эфир	—120	25	0,00152	0,00150

Из жидкостных термометров наиболее распространены ртутные, имеющие ряд достоинств: ртуть не смачивает стекло (стенки капилляра), в широком диапазоне температур остается жидкой и имеет стабильный коэффициент расширения. Это приводит к тому, что ртутные термометры обладают почти равномерной шкалой и обеспечивают высокую точность измерения температуры. Нижний предел измерения (—35 °С) определяется температурой затвердевания ртути, а верхний (650 °С) — температурой начала размягчения стекла. Недостатком ртутных термометров является сравнительно небольшой коэффициент расширения (см. табл. 4).

Стеклянные термометры с органическими жидкостями применяют при более низких температурах от —200 до +200 °С. Недостатками таких жидкостей являются смачиваемость стекла и непостоянство коэффициента расширения. В зависимости от метода градуировки различают две группы термометров: градуируемые при полном и неполном погружении с заданной температурой их выступающей части (обычно 20 °С).

60 с. Вычислитель обладает быстродействием до 2500 сложений в секунду. Оперативное запоминающее устройство содержит 256 слов, а долговременное запоминающее устройство — 1024 слов. На многих ТЭС ИВМ-500 обслуживает сразу два энергоблока.

Более совершенной является система управления «Комплекс», которая выполняет как информационные функции, так и функции управления и применяется на ТЭС для обслуживания одной ЭВМ нескольких энергоблоков. Ее используют на энергоблоках мощностью от 100 до 800 МВт. Структура информационной части системы «Комплекс» такая же, как и в ИВМ-500. Машина позволяет вызывать любой из 1000 измеряемых параметров на любой из восьми цифровых индикаторов. На сигнальное табло выводится до 600 параметров, скорость обегания 2000 точек в секунду. Система имеет 156 регистрируемых и вычисляемых параметров. Емкость оперативного запоминающего устройства 16 000 слов. Погрешность измерений и преобразования сигналов не превышает $\pm 0{,}5\%$.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности работы современных котлоагрегатов на ТЭС?
2. Что представляет собой система централизованного контроля и каковы ее функции?
3. Когда осуществляют индивидуальный контроль параметров?
4. Какие средства измерений являются наиболее надежными?
5. Как оборудуют пункт управления энергоблоком?
6. Какие приборы устанавливают на БЩУ и по месту измерения?
7. Для чего нужны мнемосхемы и как на них фиксируется измерительная информация?
8. Для чего необходимы ИВМ в системе централизованного контроля?
9. Каково устройство машин СЦК?

ГЛАВА IX

ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

§ 57. Общие сведения

Производство электрической и тепловой энергии на тепловых электрических станциях представляет сложный технологический процесс, где оператор без автоматики не

справится не только с выпуском качественной продукции, но и с самой технологией.

Автоматика — раздел технической кибернетики, включающий в себя теорию автоматического управления для построения, а также создания автоматических систем и технических средств для них. Слово «автомат» в переводе с греческого означает — самодвижущийся.

Автоматическая система регулирования (АСР) состоит из объекта и регулятора. Машины, аппараты и другие технические устройства, в которых протекает технологический (технический) процесс, называют *объектами регулирования.*

Устройство или приспособление, поддерживающее заданное (регулируемое) значение величины без непосредственного участия человека, называют *автоматическим регулятором.*

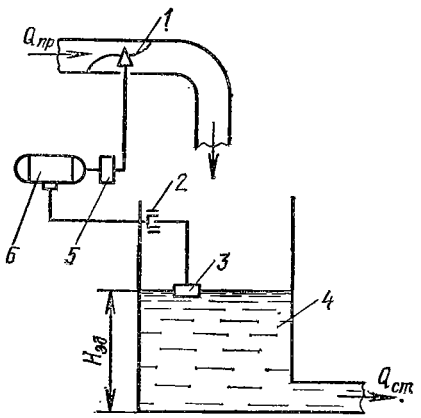


Рис. 72. Схема регулирования уровня воды в баке:

1 — регулирующий клапан, *2* — контактная система, *3* — поплавок, *4* — бак с водой (объект регулирования), *5* — редуктор, *6* — электродвигатель; $Q_{пр}$ — приток жидкости, $Q_{ст}$ — расход жидкости на стоке, $H_{зд}$ — заданный уровень в баке

Чтобы понять процесс регулирования, рассмотрим схему регулирования уровня воды в баке (рис. 72). В баке *4* должен поддерживаться заданный уровень $H_{зд}$. Приток жидкости $Q_{пр}$ можно изменять клапаном *1*. Поплавок *3* связан через контактную систему *2* с электродвигателем *6*. Через редуктор *5* и шток можно воздействовать на открытие или закрытие клапана *1*. Процесс регулирования происходит так: при изменении заданного уровня $H_{зд}$ поплавок замыкает ту или иную пару контактов; отключается электродвигатель и через редуктор и шток изменяет положение клапана *1*, а значит, и расход жидкости на притоке $Q_{пр}$; при восстановлении равновесия $H_{зд}$ контакты размыкаются и электродвигатель питательного насоса включается. Элементы системы и их взаимную связь можно изобразить условно (рис. 73). На схеме показаны бак с жидкостью (объект регулирования) и контактная система КС с поплав-

Термометры первой группы обладают более высокой точностью измерения и используются в лабораторных условиях, термометры второй группы (технические) — для измерения температур в промышленности (глубина их погружения в миллиметрах указана на обратной стороне шкалы). Технические термометры по форме нижней части с резервуаром бывают прямыми типа А и угловыми типа Б (нижняя часть изогнута под углом 90° по отношению к шкальной части).

Пределы основной погрешности стеклянных термометров указываются в их паспорте и зависят от диапазона измерений, цены деления шкалы и вида термометрической жидкости. Если при измерениях температура выступающей части технического термометра отличается от температуры его градуировки, возникает дополнительная погрешность за счет выступающего столбика жидкости. Ее устраняют поправкой к показаниям термометра $C=n\gamma(t^{\circ}_{\text{вс}}-t^{\circ})$, где n — число градусов в выступающем столбике; γ — видимый коэффициент расширения; $t_{\text{вс}}$ — температура выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром; t° — температура выступающего столбика при градуировке. Эту погрешность необходимо учитывать для термометров с органическими жидкостями.

Другой дополнительной погрешностью, характерной для стеклянных термометров, является смещение их нулевой точки в сторону отрицательных градусов. Это объясняется тем, что стекло после нагрева при измерении в нормальных условиях не сразу принимает свой первоначальный объем, причем чем выше измеряемая температура, тем смещение больше. Например, у технических термометров со шкалой 0—600 °С смещение достигает 3 °С.

Точность показаний технических термометров зависит от способа и места их установки. Применяют два способа установки ртутных термометров: в защитных оправах (гильзах, рис. 12) и без них прямым погружением термометров в измеряемую среду. Первый способ используют для измерения температуры среды, находящейся под избыточным давлением, при этом длина защитной гильзы зависит от требуемой глубины погружения.

При измерении температуры среды в трубопроводе термометры устанавливают на участках с восходящим потоком. Различные способы установки термометров на трубопроводе показаны на рис. 13, *а — г*. При такой установке улучшается теплообмен между движущейся средой и термометром. Для уменьшения отвода теплоты гильзой

ком (измерительно-командное устройство, выполняющее функции сравнения заданного уровня с действительным). Отклонение уровня от заданного значения $H_{зд}$ называется *рассогласованием*. В измерительно-командное устройство обычно входят преобразователь (датчик) — чувствительный элемент, реагирующий на изменение технологического процесса, и задатчик *Зд*, создающий на входе регулятора эталонный сигнал, с которым сравнивается сигнал датчика. Внешние или внутренние причины, нарушающие установившийся режим работы регулируемого объекта, называют *возмущениями*, совокупность измерительных, командных и усилительных устройств — *регулятором*. Клапан *Кл* называют *регулирующим органом*, он получает управляющее воздействие от регулятора. Регулятор *Рег* с помощью регулирующего органа нейтрализует возмущения, поступающие на систему. Уровень в баке — это регулируемая величина (параметр). *Регулируемый параметр* представляет собой физическую величину, которую нужно поддерживать на заданном значении.



Рис. 73. Структурная схема автоматической системы регулирования уровня воды в баке: *О* — объект, *ЭлР* — электродвигатель с редуктором, *Д* — датчик, *КС* — контактная система, *Зд* — задатчик, *Рег* — регулятор, *Кл* — регулирующий клапан

Все воздействия, поступающие на АСР, называют сигналами: входной сигнал — на входе в систему, выходной сигнал — на выходе из системы, управляющий сигнал — регулируемая величина, воздействие на регулируемый объект.

Перемещение регулирующего органа осуществляется электродвигателем с редуктором *ЭлР*, который называют *исполнительным механизмом (сервомотором)*. Элементы измерения, сравнения и усиления могут выполняться как единый блок. Исполнительные механизмы также могут изготовляться вместе с регулирующим органом (например, пневматический клапан). Если регулирующий орган приводится в действие энергией чувствительного элемента, имеем регулятор прямого действия.

Если регулятор для воздействия на регулирующий орган использует внешнюю энергию, то его называют регулятором непрямого действия. В промышленности, где требуются большие усилия по перемещению регулирующих органов,

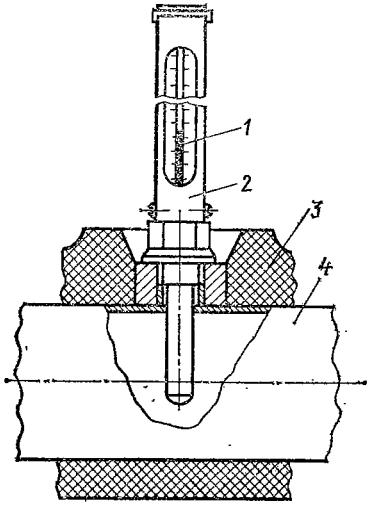


Рис. 12. Установка ртутного термометра в защитной гильзе:
1 — термометр, *2* — защитная гильза, *3* — тепловая изоляция, *4* — трубопровод

в окружающую среду ее выполняют из металлов, плохо проводящих теплоту (нержавеющая сталь). Выступающие части защитных гильз покрывают теплоизоляцией.

При установке ртутного термометра без гильзы уменьшается отвод теплоты от резервуара, повышается быстродействие прибора, но возрастает влияние давления измеряемой среды на показания термометра (сжатие резервуара с выдавливанием ртути в капилляр). Поэтому такой способ используют для сред с небольшими давлениями и обычно при кратковременных точных измерениях их температуры.

Для регулирования температуры и сигнализации в лабораторных и промышленных условиях применяют элект-

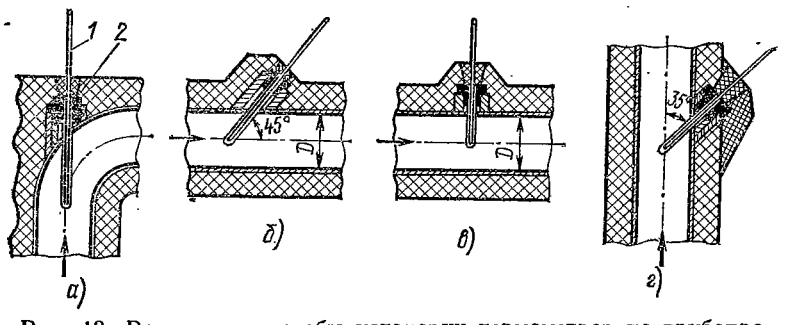


Рис. 13. Различные способы установки термометров на трубопроводе (*а* — *г*):
1 — термометр, *2* — гильза

роконтактные ртутные термометры в интервале от —30 до +300 °С. Их выпускают с постоянными рабочими контактами *1*, впаянными в капилляр *2* (рис. 14). При изме-

эти регуляторы получили преимущественное распространение.

Все автоматические системы регулирования разделяют на две группы: разомкнутые, в которых воздействие регулятора *Рег* на объект *О* не зависит от выходного сигнала регулируемого объекта (рис. 74), и замкнутые, в которых регулирующий объект и регулятор *Рег* взаимосвязаны. Сигнал с выхода объекта *О* является входом для регулятора, а сигнал с выхода регулятора

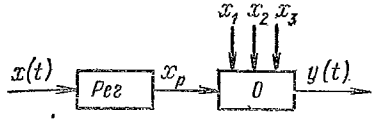


Рис. 74. Структурная схема разомкнутой АСР:

$x(t)$ — сигнал на входе АСР, $x_р$ — управляющий сигнал, x_1—x_3 — внешние возмущения, $y(t)$ — сигнал выхода (регулируемый параметр)

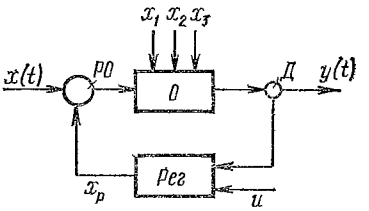


Рис. 75. Структурная схема замкнутой АСР:

u — сигнал задания, *РО* — регулирующий орган, *Д* — датчик

Рег — управляющим для регулирующего органа *РО* (рис. 75).

Элементы, входящие в систему автоматического регулирования, обладают свойством направленного действия, т. е. сигналы передаются лишь в одном направлении, например с выхода объекта на вход регулятора, с выхода регулятора на вход объекта.

§ 58. Переходные процессы в АСР и характеристики объектов регулирования

Рассмотрим процесс изменения регулируемого параметра — уровня $H_{зд}$ в баке (см. рис. 72) при подаче возмущения на систему. Предположим, что в начальный момент времени существует динамическое равновесие, т. е. приток жидкости равен ее стоку, и уровень стабилизирован. Если регулятор отключен, то в системе изменение уровня под воздействием возмущения будет зависеть от свойств объекта. Представим, что расход жидкости на притоке возрос. Тогда уровень в баке начинает повышаться до тех пор, пока приток и сток не уравняются. Уровень в этом случае стабилизируется в новом установившемся состоянии H_1 (рис. 76). Возможен случай, когда создано такое возмущение, что сток не может уравновесить расход жидкости на притоке. Тогда уровень в баке будет постоянно повышаться.

нении температуры столбик ртути доходит до нового ее значения, замыкая или размыкая электрическую цепь, в результате чего появляется или пропадает электрический сигнал. Этот сигнал можно усилить и передать в цепь системы управления.

Кроме рассмотренных существуют специальные термометры: медицинские, метеорологические, почвенные и другого назначения. Стеклянные жидкостные термометры являются одним из наиболее точных средств измерений температуры, но имеют узкий диапазон использования.

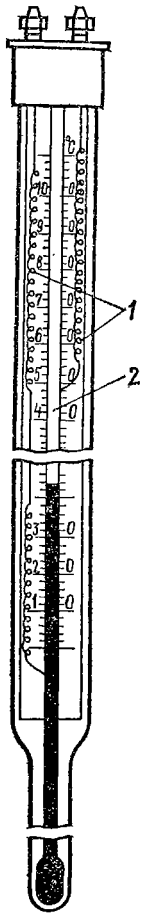


Рис. 14. Электроконтактный ртутный термометр

§ 11. Дилатометрические термометры

Твердые вещества, как и жидкости, в зависимости от температуры меняют свои геометрические размеры. Так, зависимость длины твердого тела от его температуры $l=l_0[1+\beta(t^\circ-t_0^\circ)]$, где l_0 — начальная длина вещества при фиксированной температуре t_0°; β — коэффициент температурного расширения, 1/°С; t° — текущая температура вещества. Средние значения коэффициента β (1/°С) некоторых материалов в диапазоне температур от 0 до 200 °С приведены ниже:

Алюминий	$24\cdot10^{-6}$
Железо	$12{,}5\cdot10^{-6}$
Инвар (сплав Fe и Ni)	$3{,}5\cdot10^{-6}$
Латунь	$18{,}5\cdot10^{-6}$
Сталь	$17\cdot10^{-6}$
Фарфор	$3{,}5\cdot10^{-6}$

На тепловом расширении тел основан принцип действия дилатометрических термометров, которые состоят из двух материалов с разными коэффициентами β. Под воздействием температуры материал с высоким коэффициентом β удлиняется больше, что приводит к перемещению стрелки прибора. По конструкции дилатометрические термометры разделяют на стержневые и пластинчатые (биметаллические). Устройство биметаллического термометра показано на рис. 15.

Из-за нестабильности коэффициента β дилатометрические термометры не получили широкого распространения.

Их применяют в качестве чувствительных элементов сигнализаторов температуры, а иногда для компенсации влияния температуры окружающей среды на показания приборов, в которые их встраивают.

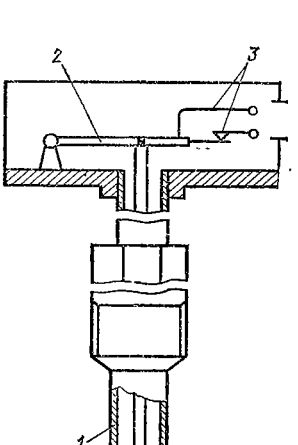


Рис. 15. Биметаллический термометр сигнализации температуры:

1 — биметаллическая пластина, *2* — измерительный рычаг, *3* — рабочие контакты сигнальной электрической цепи

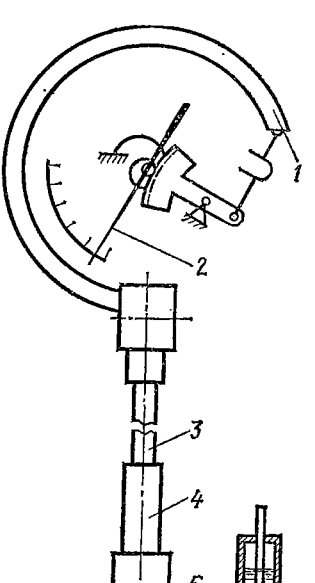


Рис. 16. Показывающий манометрический термометр конденсационного типа (*а*) и сечение его баллона (*б*)

§ 12. Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления рабочего вещества, занимающего замкнутый объем, от температуры. По виду рабочего вещества эти термометры разделяют на газовые, конденсационные и жидкостные. Рабочее вещество выбирают исходя из заданного диапазона измерений и условий работы.

Таким образом имеет место переход во времени из одного установившегося состояния в другое. Такой процесс в разомкнутой системе называется переходным, и его характер определяется свойствами объекта. Графики этих процессов приведены на рис. 76. Кривая *а* характеризует объект *с самовыравниванием*, т. е. когда выходная величина устанавливается при новом значении, кривая *б* дает представление об объекте без самовыравнивания, т. е. выходная величина изменяется так, что не достигается ее устойчивое состояние.

Для замкнутых систем регулирования переход из одного состояния в другое называют *процессом регулирования*.

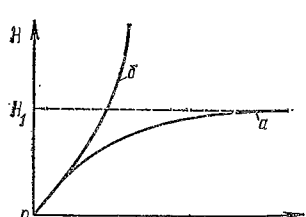


Рис. 76. Динамические характеристики объектов: *а* — объект с самовыравниванием, *б* — объект без самовыравнивания

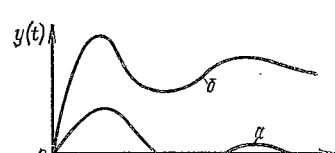


Рис. 77. Переходные характеристики в замкнутых АСР: *а* — возмущение, приложенное к объекту, *б* — возмущенне, приложенное к регулятору

Его вид зависит от свойств объекта, приложенных к АСР возмущающих воздействий и свойств регулятора. На рис. 77 показаны различные процессы регулирования. Процесс, изображенный кривой *а*, характерен для замкнутых систем, когда отрабатывается возмущение, приложенное к объекту. Если возмущение подано на регулятор, это означает, что изменяется задание, т. е. процесс регулирования (кривая *б*) отражает переход с одного уровня на другой.

Объекты регулирования описывают с помощью статических и динамических характеристик.

Зависимость выходной величины от входной в установившемся состоянии называют *статической характеристикой* $y(t)=f[x(t)]$. Примером этой характеристики служит зависимость термоэлектродвижущей силы E термопары от температуры измеряемой среды (рис. 78).

Динамические свойства объектов и систем описываются дифференциальными уравнениями, временны́ми и частотными характеристиками, а также передаточными функция-

Показывающий манометрический термометр (рис. 16) имеет металлический термобаллон *5* с рабочим веществом, который погружается в измеряемую среду. Один конец баллона запаян, а другой соединен с медной или стальной трубкой *3* (называемой капилляром), имеющей диаметр до 0,5 мм и толщину стенки до 2,5 мм. На нижнюю часть капилляра надет штуцер *4* с наружной резьбой, с помощью которого термобаллон устанавливают в трубопроводы, баки и др. Длина капилляра от 0,6 до 60 м. Верхний конец капилляра соединен с одно- или многовитковой трубчатой пружиной *1*, подвижный конец которой наглухо закрыт и соединен со стрелкой *2* шкалы прибора.

Известно, что при повышении температуры давление увеличивается, а при снижении уменьшается. Изменение давления рабочего вещества передается через капилляр пружине манометра, которая частично выпрямляется, вызывая перемещение стрелки по шкале прибора.

Газовые манометрические термометры, заполняемые азотом, выпускаются для измерения температур от —200 до +600 °С, классом точности 1 и 1,5 и имеют равномерную шкалу, определяемую уравнением $p_2 - p_1 = p_1\beta(t_2^\circ - t_1^\circ)$, где p_1, p_2 и t_1°, t_2° — начальные и конечные давления и температуры рабочего вещества; β — температурный коэффициент давления, K^{-1}, равный коэффициенту расширения.

На показания газовых манометров может влиять температура окружающей среды. Отличие этой температуры от ее значения, принятого при градуировке прибора ($t^\circ = 20$ °С), вызывает изменение давления газа в термометре, что сказывается на его показаниях. Для снижения влияния температуры окружающей среды стремятся уменьшить отношение объема пружины и капилляра к объему термобаллона. Так, при длине капилляра 1,6—2,5 м и 40 м длина корпуса термобаллона соответственно 125 мм и 500 мм.

Для дальнейшего снижения температурной погрешности вводят в передаточный механизм прибора биметаллический компенсатор.

Конденсационные манометрические термометры выпускаются для измерения температур от —50 до +300 °С классом точности 1,5; 2,5 и имеют неравномерную шкалу. Термобаллон заполняют низкокипящей жидкостью (фреоном, пропиленом, ацетоном, этилбензином), которая находится в равновесии с насыщенным паром. При этом температура жидкости нелинейно зависит

ми. К временным относят переходные и импульсные характеристики.

ереходная характеристика (рис. 79, *а*) отражает изменение выходной величины во времени под воздействием однократного ступенчатого возмущения, а *импульсная характеристика* (рис. 79, *б*) — изменение выходной величины во времени под воздействием сигнала на входе в виде прямоугольного импульса $t_и$. Ограничение входного импульса обычно связано с технологическими условиями работы оборудования. *Частотные характеристики* можно получить, если подать на вход объекта синусоидальные или прямоугольные периодические воздействия. Если на вход

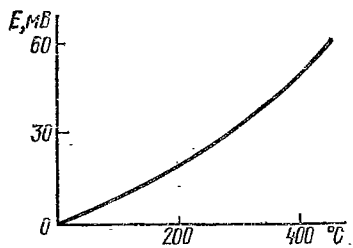


Рис. 78. Зависимость термоэдс термопары от температуры измеряемой среды

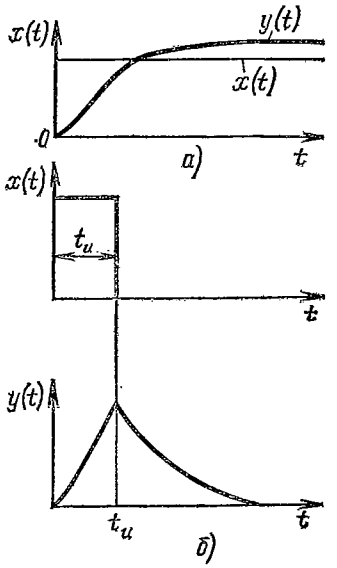


Рис. 79. Временны́е характеристики:
а — переходная, *б* — импульсная

подают сигнал $x(t)=A_{вх}\sin\omega t$ ($A_{вх}$ — амплитуда входного сигнала; $\omega=2\pi/T$ — угловая частота колебаний; T — период колебаний), то через некоторое время на выходе объекта установятся вынужденные синусоидальные колебания той же частоты, но отличающиеся по амплитуде и фазе: $y(t)=A_{вых}\sin(\omega t-\varphi)$, где $A_{вых}$ — амплитуда выходных колебаний; φ — сдвиг колебаний по фазе.

Используя рис. 80, можно определить амплитуду выхода и сдвиг по фазе: $\varphi=2\pi\Delta t/T=\omega\Delta t$. Зависимость отношения амплитуды колебаний на выходе регулируемого объекта к амплитуде колебаний на входе от частоты называют *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ): $A(\omega)=A_{вых}(\omega)/A_{вх}(\omega)$. Зависимость сдвига фазы от входной

от давления насыщенных паров. Капилляр и пружину обычно заполняют другой жидкостью (например, метаксилолом). Достоинствами этих манометров являются независимость показаний от температуры окружающей среды, большее быстродействие, чем у газовых термометров, слабое влияние колебаний атмосферного давления на показания, а их недостатками — неравномерность шкалы, особенно начального участка, зависимость показаний от расположения термобаллона и корпуса прибора. Если термобаллон расположен выше корпуса, показания прибора будут завышены, если ниже,— занижены. Вследствие этой погрешности длина капилляра не превышает 25 м.

Жидкостные манометрические термометры выпускают для измерения температур от 150 до 300 °С, классом точности 1; 1,5 и имеют равномерную шкалу. Их заполняют силиконовыми жидкостями, метансилоном, пропиловым спиртом.

Жидкостные термометры отличаются от газовых и конденсационных тем, что их рабочее вещество несжимаемо, благодаря чему обеспечивается наибольшее среди манометрических термометров быстродействие. Изменения атмосферного давления на показания манометра влияния не оказывают. Недостатки жидкостных термометров — зависимость их показаний от температуры окружающей среды, а также существенная гидростатическая погрешность из-за различных уровней расположения термобаллона и измерительного прибора. Для устранения первого недостатка применяют те же способы, что и в газовых термометрах, а для устранения второго ограничивают длину капилляра до 10 м.

Допустимые расстояния по высоте между термобаллоном и измерительным прибором оговариваются инструкцией.

Манометрические термометры отличаются от других измерительных приборов простотой конструкции, автоматической записью показаний и возможностью их передачи на небольшие расстояния. Кроме того, их можно использовать в пожаро- и взрывоопасных помещениях.

Недостатками манометрических термометров являются трудность ремонта, относительно большие размеры термобаллонов, недостаточно высокая точность измерений, низкая надежность (изменение со временем упругих свойств пружины).

и выходной частот называют *фазочастотной характеристикой* (ФЧХ): $\varphi(\omega)=\varphi_{вых}(\omega)-\varphi_{вх}(\omega)$.

Важную роль при изучении процессов регулирования играют характеристики, являющиеся комбинацией частотных характеристик $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$, которые называют *комплексными частотными характеристиками* (КЧХ). Эти характеристики обычно строят на комплексной плоскости и записывают в виде вещественной $U(\omega)$ и мнимой $V(\omega)$ частей: $W(i\omega)=U(\omega)+iV(\omega)$, где i — мнимая единица ($i^2=-1$). Построить эту характеристику довольно просто: зная амплитуду АЧХ и фазу ФЧХ на заданной частоте,



Рис. 80. Графики синусоидальных входных $x(t)$ и выходных $y(t)$ колебаний

определяют точку на плоскости. Далее, меняя частоту ω, находят следующую точку и так определяют совокупность точек, соединив которые получают КЧХ исследуемого объекта.

Передаточные функции позволяют описать динамику систем в символическом, или условном, изображении. Взяв отношение изображения выходной величины $Y(p)$ к изображению входной величины $X(p)$, получают передаточную функцию $W(p)=Y(p)/X(p)$. Аргументом передаточной функции является символ p, который позволяет перевести дифференциальное уравнение, описывающее динамику объекта, в алгебраическое, т. е. упростить математическое описание.

Нетрудно заметить, что между КЧХ и передаточной функцией существует однозначная связь. Подставив в выражение передаточной функции значение $p=i\omega$, получают комплексную частотную характеристику, для которой модуль вектора можно найти из выражения: $A(\omega)=\sqrt{U^2(\omega)+V^2(\omega)}$. Угол поворота вектора вокруг начала координат $\varphi(\omega)=\operatorname{arctg} V(\omega)/U(\omega)$. Таким образом, представляя динамику объектов в той или иной форме, можно

§ 13. Термоэлектрические термометры

Принцип действия термоэлектрических термометров основан на зависимости термоэдс от температуры. Термометры состоят из двух разнородных проводников, спаянные концы которых называют горячими или рабочими, а свободные — холодными.

Зная закон изменения термоэдс термометра в зависимости от температуры, с помощью электроизмерительного прибора можно определить искомую температуру. При этом термоэлектрический термометр является первичным измерительным преобразователем, а в качестве вторичного прибора используют милливольтметры и потенциометры.

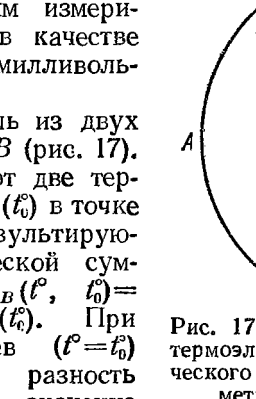


Рис. 17. Цепь термоэлектрического термометра

Рассмотрим замкнутую цепь из двух разнородных проводников A и B (рис. 17). В спаях (точек *1* и *2*) возникают две термоэдс — $e_{AB}(t^\circ)$ в точке *1* и $e_{BA}(t_0^\circ)$ в точке *2*. Действующая в контуре результирующая термоэдс равна алгебраической сумме эдс в обеих точках: $E_{AB}(t^\circ, t_0^\circ) = e_{AB}(t^\circ) + e_{BA}(t_0^\circ) = e_{AB}(t^\circ) - e_{AB}(t_0^\circ)$. При одинаковой температуре спаев ($t^\circ = t_0^\circ$) $E_{AB} = 0$. Однако чем больше разность температур t° и t_0°, тем выше значение получаемой термоэдс. Спай *1*, погружаемый в измеряемую среду, называют рабочим концом, а спай *2* — свободным концом термоэлектрического термометра.

В зависимости от значения вырабатываемой термоэдс и общего электрического сопротивления в контуре проводников возникает электрический ток, который можно измерить. Для измерения тока, а следовательно, и термоэдс термометра в его цепь с помощью проводов включают измерительный прибор *ИП* (рис. 18) двумя способами: разрывают цепь в спае *2* либо один из проводников термометра.

Рассмотрим, как влияет на значение результирующей термоэдс способ включения третьего (соединительного) проводника C. В первом случае (рис. 18, *а*) термоэлектрический термометр имеет три конца: рабочий *1* и свободные *2* и *3*. Если температура спая *1* равна t°, а спаев *2* и *3* — t_0°, то результирующая термоэдс $E(t^\circ, t_0^\circ) = e_{AB}(t^\circ) - e_{AB}(t_0^\circ)$.

Во втором случае (рис. 18, *б*) термометр имеет четыре

определить их свойства. Эта информация используется в дальнейшем для управления и поддержания заданных технологических режимов.

§ 59. Типовые динамические звенья и их характеристики

Простейшая система автоматического регулирования состоит из двух основных элементов — объекта и регулятора. Динамические характеристики объекта принято составлять из простых звеньев, каждое из которых описывается простыми зависимостями. Соединяя простейшие звенья в той или иной последовательности, можно получить математическое описание объектов управления с любой точностью. Рассмотрим основные типовые линейные звенья: усилительное, инерционное, интегрирующее, реальное дифференцирующее и запаздывания.

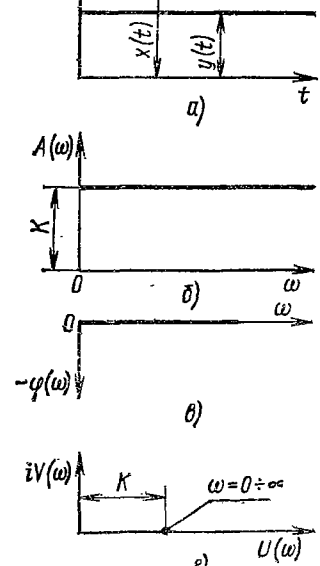


Рис. 81. Характеристики усилительного звена:
а — переходная, *б*, *в*, *г* — частотные (амплитудно-частотная, фазочастотная, комплексная)

В у с и л и т е л ь н о м з в е н е зависимость между сигналами входа и выхода выражается уравнением $y(t)=Kx(t)$, (K — коэффициент усиления). Наиболее часто усилительные звенья встречаются в механических передачах и электрических цепях. Переходная характеристика усилительного звена показана на рис. 81, *а*. Его передаточная функция определяется по формуле $W(p)=K$. Частотные характеристики звена (АЧХ, ФЧХ и КЧХ) показаны на рис. 81, *б*, *в*, *г*.

Свойства и н е р ц и о н н о г о з в е н а во временно́й области определяются зависимостью $Ty'(t)+y(t)=Kx(t)$. Такое математическое описание имеет, например, объект в виде бака с жидкостью (см. рис. 72) с притоком на входе и свободным стоком на выходе. Уровень в баке служит выходным параметром. Передаточная функция зве-

конца: рабочий *1*, свободный *2* и нейтральные *3* и *4*. Если температура спаев *3* и *4* одинакова, результирующая термоэдс $E(t^\circ, t_0^\circ) = e_{AB}(t^\circ) - e_{AB}(t_0^\circ)$.

Таким образом, результирующая термоэдс в обоих случаях будет одинакова, если температуры спаев нового проводника C с термоэлектродами A и B равны. Первый способ подсоединения измерительного прибора получил большее распространение.

Измерение температуры термоэлектрическим термометром допускается тогда, когда точно известна температура

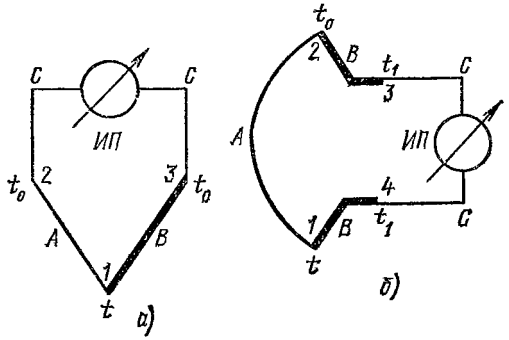


Рис. 18. Схемы включения измерительного прибора в цепь термоэлектрического термометра:
а — в место спая, *б* — в один из проводников

t_0° его свободного конца. Зависимость термоэдс $E(t^\circ, t_0^\circ)$ термометра от температуры t° рабочего конца при температуре его свободных концов $t_0^\circ = 0\,^\circ\text{C}$ определяется экспериментально и называется *градуировочной характеристикой термометра.* На основании этой зависимости составляют градуировочные таблицы и графики для измерения температуры.

На практике температура свободных концов термометра, хотя и поддерживается постоянной, но не равна 0 °С, поэтому термоэдс тоже меняется и приходится вносить поправки в показания прибора.

Для введения поправки (при $t_0^\circ \neq 0^\circ$) необходимо к полученной термоэдс термометра $E(t^\circ, t_0^\circ)$ прибавить термоэдс $E(t_0^\circ, 0^\circ)$, взятую из градуировочных таблиц данных термоэлектродов. По полученной сумме с помощью градуировочных таблиц определяют искомую температуру. При увеличении температуры (t_0°) свободных концов тер-

на выражается уравнением $W(p)=K/(Tp+1)$, где T — постоянная времени (время, необходимое для измерения выходной величины от исходного значения до нового установившегося значения при постоянной скорости, полученной в начальный момент); K — коэффициент пропорциональности.

Переходная характеристика усилительного звена показана на рис. 82, *а*, его амплитудно-частотная и фазочастот-

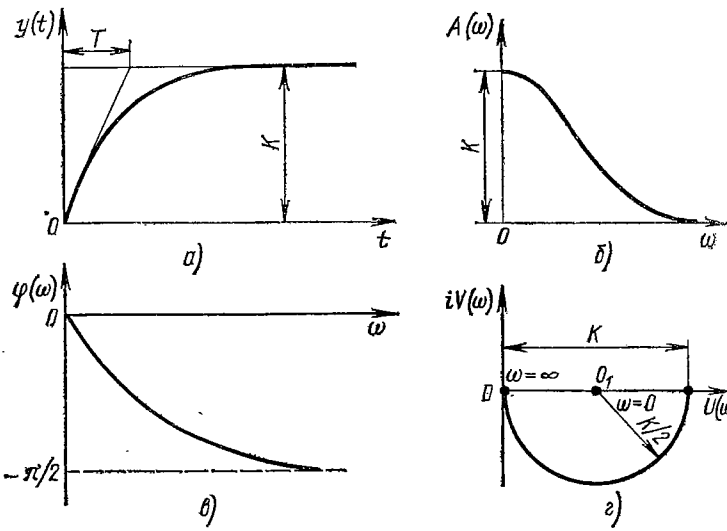


Рис. 82. Характеристики инерционного (апериодического) звена: *а* — переходная, *б, в, г* — частотные (амплитудно-частотная, фазочастотная, комплексная)

ная характеристики — на рис. 82. *б*, *в*. Следует отметить, что с увеличением частоты ФЧХ стремится к углу сдвига $\pi/2$. Таким образом, в этом звене выходные частоты отстают от входных. Звенья, в которых выходные и входные колебания сдвинуты по фазе, называют *фазосдвигающими*.

Комплексную частотную характеристику инерционного звена определяют по формуле $W(i\omega)=K/(Ti\omega+1)$. Графически она изображается в виде полуокружности в комплексной плоскости (рис. 82, *г*).

Свойствами интегрирующего звена обладают исполнительные механизмы с постоянной скоростью. Звено называют интегрирующим, если скорость изменения его выходной величины пропорциональна входной величи-

мометра его термоэдс уменьшается на значение, равное термоэдс $E(t_0^\circ, 0^\circ)$ такого же термометра. Поправку в показания прибора вводят автоматически или расчетным путем.

При измерениях температуры термоэлектрическими термометрами применяют различные схемы соединений. Наиболее распространенные из них термобатарея и дифференциальные термометры. Первую схему используют для увеличения коэффициента преобразования термоэдс в температуру. Термоэдс термобатареи из n термопар, соединенных последовательно, в n раз больше термоэдс одной термопары. Однако при этом соединении трудно поддерживать постоянной температуру всех свободных концов термопар, а следовательно, невозможно повысить общую точность измерения.

Схему соединения с дифференциальными термометрами используют при измерении разности температур t_1° и t_2°. Применяют две пары термоэлектродов, рабочие концы которых имеют температуры t_1° и t_2°, а свободные концы соединены встречно (т. е. соединены концы одинаковых термоэлектродов). Тогда результирующая термоэдс $E(t_1^\circ, t_2^\circ) = e(t_1^\circ) - e(t_2^\circ)$. При разности температур не более 25 °С эта зависимость имеет линейный вид.

Материалы термометров должны обладать стабильной градуировочной характеристикой (независимость ее от высоких температур и влияния вредных факторов) и небольшим электрическим сопротивлением, незначительно изменяющимся с ростом температуры.

Кроме того, термометрические термометры бывают стандартных и нестандартных градуировок. Наиболее распространенные на ТЭС термоэлектрические термометры стандартных градуировок приведены в табл. 5.

Из таблицы видно, что для измерения температур выше 1000 °С применяют термометры ТПП и ТПР. Достоинствами этих термометров являются высокая воспроизводимость градуировочной характеристики и стабильность, а их недостатками — большая чувствительность и высокая стоимость термоэлектродного материала. Материалы термометров ТПП и ТПР удовлетворяют практически всем требованиям, указанным ранее.

Самые распространенные термометры ТХА и ТХК применяют для измерения температуры до 1000 °С. Достоинствами этих термометров являются более высокие (в 8 раз) термоэдс, чем у термометров ТПП и ТПР при измерении одной и той же температуры, и низкая стоимость,

не: $y'(t)=K_и x(t)$, где $K_и$ — коэффициент, имеющий размерность, обратную времени.

На рис. 83, *а* показана переходная характеристика звена, передаточная функция которого $W(p)=K_и/p$. Комплексную частотную характеристику (КЧХ) звена опреде-

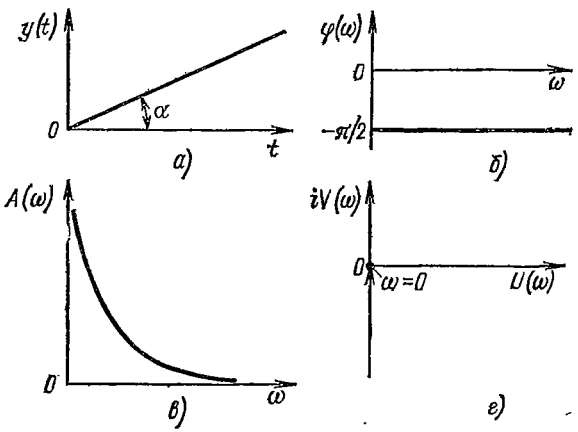


Рис. 83. Характеристики интегрирующего звена:
а — переходная, *б*, *в*, *г* — частотные (фазочастотная, амплитудно-частотная, комплексная)

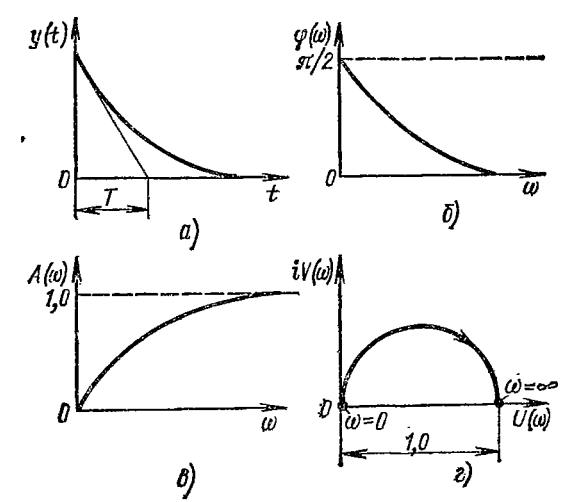


Рис. 84. Характеристики реального дифференцирующего звена:
а — переходная, *б*, *в*, *г* — частотные (фазочастотная, амплитудно-частотная, комплексная)

Таблица 5. **Термоэлектрические термометры стандартных градуировок**

Тип термометра	Материал термоэлектродов *		Градуировка	Диапазон измерений, °С
	положительного	отрицательного		
Платинородий-платиновый ТПП	Платинородий (90% Pt, 10% Rh)	Платина (100% Pt)	ПП	0—1300
Платинородий-платинородиевый ТПР	Платинородий (70% Pt, 30% Rh)	Платинородий (94% Pt, 6% Rh)	ПР 30/6	300—1600
Хромель-алюмелевый ТХА	Хромель (89% Ni, 9,8% Cr, 1% Fe, 0,2% Mn)	Алюмель (94% Ni, 2% Al, 2,5% Mn, 1% Si, 0,5% Fe)	ХА	—200—1000
Хромель-копелевый ТХК	То же	Копель (55% Cu, 45% Ni)	ХК	—200—600

* В наименовании материалов термоэлектродов первым указан электрод с положительным зарядом.

ляют по формуле $W(i\omega)=K_и/(i\omega)$. Интегрирующее звено является также фазосдвигающим: $\varphi(\omega)=\pi/2$. Частотные характеристики звена (ФЧХ, АЧХ, КЧХ) показаны на рис. 83, *б*, *в*, *г*.

В р е а л ь н о м д и ф ф е р е н ц и р у ю щ е м з в е н е зависимость между сигналами входа и выхода выражается уравнением $Ty'(t)+y(t)=Tx'(t)$. В отличие от ранее рассмотренных звеньев реальное дифференцирующее

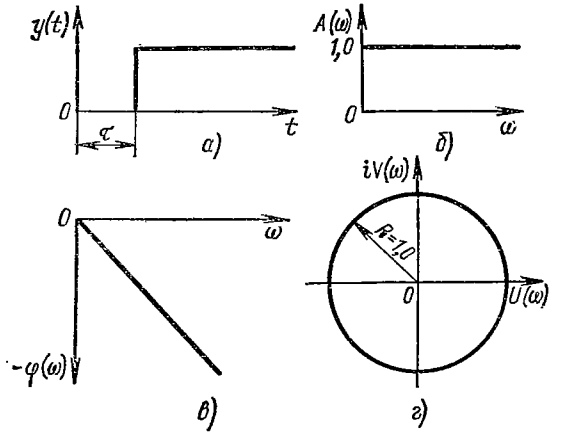


Рис. 85. Характеристики звена запаздывания:
а — переходная, *б*, *в*, *г* — частотные (амплитудно-частотная, фазочастотная, комплексная)

звено является *фазоопережающим*, т. е. выходные колебания $y(t)$ опережают входные $x(t)$.

Передаточная функция звена выражается уравнением $W(p)=Tp/(Tp+1)$. Временна́я (переходная) характеристика описывается экспоненциальной зависимостью $y(t)=\exp(-t/T)$, показанной на рис. 84, *а*. Частотные характеристики звена приведены на рис. 84, *б*, *в*, *г*. Реальные дифференцирующие звенья встречаются в автоматических системах регулирования, например в автоматических регуляторах.

Примером з в е н а з а п а з д ы в а н и я может служить транспортер-дозатор сыпучих материалов. Входной сигнал, пройдя по транспортеру, проявится на выходе звена только через время τ; при этом он не претерпевает изменений по амплитуде. Временна́я (переходная) характеристика (рис. 85, *а*) звена имеет вид ступеньки, сдвинутой на время τ относительно момента возмущения. Таким обра-

а их недостатками — меньшая стабильность показаний при длительной эксплуатации.

Устройство термоэлектрического термометра показано на рис. 19. В нижней части термометра находится его рабочий конец *9*, состоящий из двух сваренных термоэлектродов, на каждый из которых в качестве изоляции надеты фарфоровые трубки *8*. В головке *3* термометра расположена изоляционная колодка *6* с зажимами *1* для термоэлектродов и соединительных проводов *5*. Для механической прочности и защиты от вредного воздействия измеряемой и окружающей сред эти термометры помещают в специальный чехол из металлических материалов, выдерживающих высокую температуру и давление среды. Чехол состоит из гильзы *10*, неподвижного *7* (или подвижного) штуцера с сальниковым уплотнением и головки, снабженной крышкой *2* и выходным патрубком *4* с уплотнением. В настоящее время конструкции защитной арматуры унифицированы; они отличаются лишь видами штуцеров и чехлов, выполняемых на различные давления измеряемой среды.

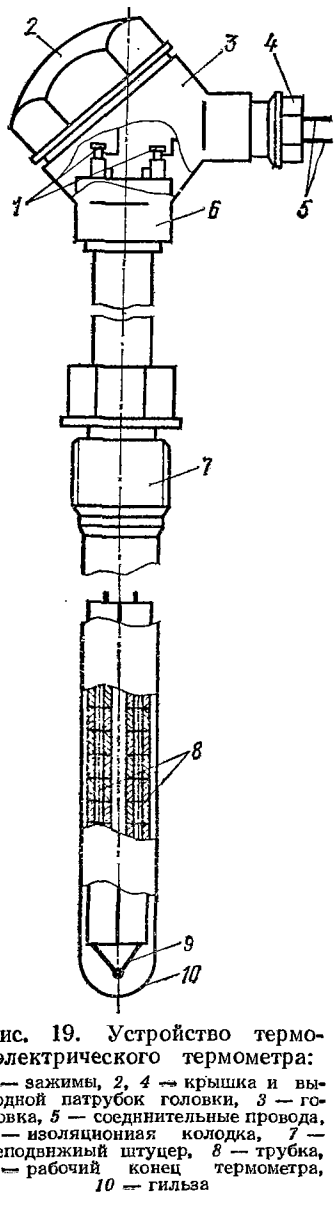


Рис. 19. Устройство термоэлектрического термометра:
1 — зажимы, *2*, *4* — крышка и выходной патрубок головки, *3* — головка, *5* — соединительные провода, *6* — изоляционная колодка, *7* — неподвижный штуцер, *8* — трубка, *9* — рабочий конец термометра, *10* — гильза

Для обеспечения хорошего теплового контакта и меньшей инерционности в показаниях рабочий спай термометра может быть приварен к защитной гильзе. Однако в этом случае замена термоэлектродов затруднительна,

зом, амплитудно-частотная характеристика представляет собой прямую, параллельную оси частот (рис. 85, *б*), при этом сдвиг по фазе линейно зависит от частоты: $\varphi(\omega)=-2\pi\tau/T$.

Фазочастотная характеристика звена запаздывания графически показана на рис. 85, *в*. Комплексная частотная характеристика звена, изображенная единичной окружностью (рис. 85, *г*) с центром в начале координат, выражается уравнением $W(p)=\exp(-i\omega\tau)$. Из этого уравнения определяют передаточную функцию звена $W(p)=\exp(-p\tau)$.

В промышленности звенья запаздывания встречаются довольно часто (например, длинные трубопроводы, транспортеры и другие участки объектов).

§ 60. Устойчивость и качество автоматических систем регулирования

Для стабилизации и регулирования заданных параметров в автоматических системах регулирования АСР используется информация о состоянии выходной величины, поэтому контур регулирования замыкается через регулирующее устройство по схеме обратной связи. Системы с обратными связями склонны к самовозбуждению. Форма переходных процессов в них зависит от вида уравнений, описывающих АСР. В таких системах одной из задач является оценка их устойчивости.

Система считается *устойчивой*, если после снятия возмущения она возвращается к равновесному состоянию. На рис. 86, *а* показана устойчивая система, так как она возвращается к исходному состоянию, совершая затухающие колебания. Если система после снятия возмущения совершает незатухающие колебания (рис. 86, *б*), она находится *на границе устойчивости*. Если амплитуда выходных колебаний возрастает, АСР называют *неустойчивой* (рис. 86, *в*). Такие системы неработоспособны.

Автоматическая система регулирования, находящаяся на границе устойчивости или вблизи нее, может потерять устойчивость при воздействии самых незначительных возмущений. Поэтому при расчете систем регулирования вводится запас устойчивости, позволяющий сохранять ее в работоспособном состоянии.

В устойчивом состоянии реакция системы на любое возмущение будет неоднозначной. Чтобы определить, какие параметры следует выбрать для анализа устойчивости, вводится понятие *качества систем автоматического регулирования*.

Простейшими показателями качества переходных процессов принято считать максимальное отклонение регулируемого параметра от заданного значения и длительность процесса регулирования. Рассмотрим процесс регулирования в одноконтурной АСР, включающей объект и регулятор (рис. 87). Чем меньше амплитуды первого отклонения регулируемого параметра при общем затухающем характере процесса регулирования, тем лучше работает АСР, при этом учитывают и время регулирования $t_{рег}$, за которое параметр p возвратится в исходное состояние или не будет выходить за пределы зоны нечувствительности Δ. Зону нечувствительности определяют как область, в которой изменения параметра p незначительны и не вызывают действия регулятора.

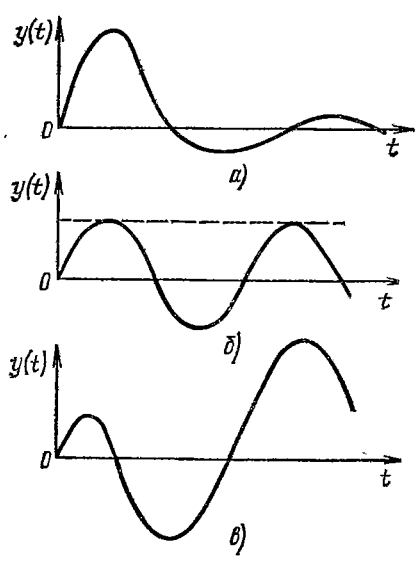


Рис. 86. Переходные процессы в автоматической системе регулирования:
а — затухающие колебания, *б* — незатухающие колебания, *в* — расходящиеся колебания

Процесс регулирования обычно считается удовлетворительным, если он соответствует двум показателям качества: динамическому отклонению (или первой амплитуде) и длительности процесса регулирования.

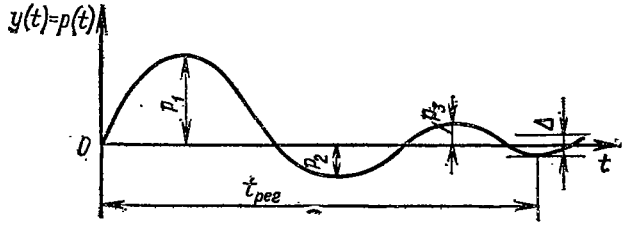


Рис. 87. График процесса регулирования в одноконтурной АСР

так как арматура термометра сохраняется дольше, чем его электроды. В рабочих условиях необходимо свободные концы термоэлектродов перенести в зону с постоянной температурой. С этой целью к свободным концам термоэлектродов присоединяют компенсационные (удлиняющие) провода из тех же материалов, что и термоэлектроды термометра. Однако для термометров ТПП и ТПР это дорого. Поэтому компенсационные провода изготовляют из других металлов, которые развивают в паре между собой такую же эдс, как и термоэлектрический термометр, не являясь



Рис. 20. Схема измерения термоэдс термометра с устройством КТ-54 для автоматического введения поправки на температуру свободных концов

при этом дефицитными. Так, для ТПП один компенсационный провод выполняют из меди, а второй — из медно-никелевого сплава.

В связи с тем что свободные концы удлиняющих проводов термометра имеют температуру окружающего воздуха, для автоматического введения поправки в его показания часто используют устройство КТ-54 (рис. 20), которое представляет собой мостовую схему, питаемую постоянным током и состоящую из медного резистора $R_м$ и резисторов $R1 — R4$, выполненных из манганина и имеющих низкий температурный коэффициент сопротивления. Если температура окружающей среды $t=0$ °С, то напряжение U_{ab} моста равно 0. Если $t\neq 0$ °С, из-за изменения сопротивления резистора $R_м$ равновесие моста нарушается и возникает дополнительное напряжение, которое суммируется с термоэдс, обеспечивая независимость показаний от температуры окружающей среды.

Компенсационные провода выпускают одножильными

Так как процесс регулирования имеет затухающий характер, вводят еще показатель — степень затухания.

Степень затухания — отношение разности амплитуд двух соседних колебаний одного знака к первой из них: $\psi=(p_1-p_2)/p_1$. Требуемый запас устойчивости обеспечивается, если степень затухания $\psi=0{,}75\div0{,}9$.

§ 61. Основные законы регулирования

В замкнутой системе регулирования регулирующий орган перемещается под воздействием сигнала $x_р$, который формируется регулятором (см. рис. 75). Зависимость перемещения регулирующего органа $x_р$ от отклонения регулируемого параметра $y(t)$ называется *законом регулирования*. Качество регулирования обеспечивается выбором закона регулирования.

Для тепловых процессов наибольшее распространение получили пропорциональный (П), интегральный (И) и пропорционально-интегральный (ПИ) законы регулирования.

Для регуляторов, работающих по П-з а к о н у р е г у л и р о в а н и я, относительное перемещение регулирующего органа $x_р$ пропорционально относительному отклонению регулирующей величины: $x_р(t)=K_р y(t)$, где $K_р$ — коэффициент пропорциональности. Для замкнутых АСР, работающих с П-регуляторами, характерно наличие остаточной неравномерности (отклонения).

И н т е г р а л ь н ы й з а к о н р е г у л и р о в а н и я реализует зависимость: $x_р(t)=K_и\int_0^t y(t)\,dt$, где $K_и=K_р/T_и$ — коэффициент для серийных регуляторов. Таким образом, регулирующее воздействие пропорционально интегралу отклонения регулируемой величины.

П р о п о р ц и о н а л ь н о - и н т е г р а л ь н ы й з а к о н р е г у л и р о в а н и я объединяет свойства пропорционального и интегрального законов и выражается уравнением: $x_р(t)=K_р y(t)+K_р\int_0^t y(t)dt/T_и$. Коэффициент $T_и$, называемый *постоянной времени*, характеризует степень ввода интегральной составляющей в закон регулирования. ПИ-закон регулирования — это более сложная зависимость, обеспечивающая качественное регулирование без остаточного отклонения. Динамические характери-

и многожильными с внешней цветной изоляционной пленкой. Иногда для защиты от внешних электромагнитных полей применяют металлическую оплетку провода.

Термоэдс, возникающая в термометре, сравнительно небольшая, поэтому для ее измерения служат высокоточные магнитоэлектрические милливольтметры и потенциометры, которые при значительном удалении от места измерения температуры соединяются с устройством КТ-54 медными проводами.

Принцип действия магнитоэлектрических милливольтметров основан на использовании взаимодействия тока, проходящего по обмотке подвижной рамки *1* (рис. 21) и магнитного поля постоянного магнита *3*. Полюсы *4* и *5* магнита выполняют вогнутыми, чтобы воздушный зазор между ними и сердечником рамки *2* был постоянным. При прохождении по виткам n рамки электрического тока на ее боковые стороны действует сила, перпендикулярная току I и магнитной индукции поля B, которая создает вращающий момент $M_{вр}=2nSBI$, где S — площадь рамки.

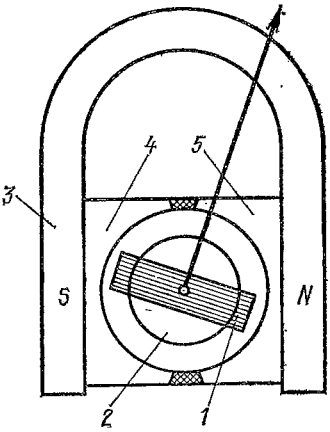


Рис. 21. Схема магнитоэлектрического милливольтметра

В приборе рамка жестко соединена с показывающей стрелкой, которая поворачивается вокруг своей оси. Чтобы угол поворота φ стрелки был пропорционален току рамки, к ней приложен противодействующий момент, который создается соединенными с осью рамки спиральными пружинами $\varphi=2nSBI/C=KI$.

Шкала милливольтметра градуируется в соответствии с характеристикой того термометра, с которым он работает. Поскольку милливольтметром измеряют не эдс, а ток I, его показания зависят и от электрического сопротивления всей измерительной цепи, в которое входят сопротивления милливольтметра, термометра и удлиняющих проводов. Так как с изменением температуры окружающей среды сопротивление цепи будет меняться, вызывая дополнительную погрешность в показаниях милливольтметра, в нее дополнительно включают терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом. Благодаря этому

градуировка милливольтметра обеспечивается независимо от окружающей температуры.

Милливольтметр представляет собой металлический корпус, служащий экраном от внешних магнитных полей, на задней стороне которого имеются зажимы для присоединения удлиняющих проводов термометра, а на передней стороне — корректор нуля прибора. В настоящее время применяют милливольтметры М-64, МР-64.

Однако с помощью милливольтметров высокая точность измерений не достигается (класс точности не превышает 1,5). Для обеспечения независимости показаний приборов от сопротивления электрической цепи вместо милливольтметров применяют потенциометры, в которых реализуется нулевой (компенсационный) метод измерения термоэдс. Потенциометры делятся на приборы с ручным уравновешиванием и автоматические (процесс измерения без участия человека), измерительные схемы которых принципиально друг от друга не отличаются.

На ТЭС получили распространение автоматические потенциометры КСП, КВП, КПП с классом точности от 0,25 до 1. Упрощенная измерительная схема таких автоматических потенциометров показана на рис. 22. Потенциометр получает питание от источника стабилизированного напряжения *ИПС*. Автоматическое введение поправки на температуру свободных концов термометра осуществляется с помощью медного резистора $R_м$. Каждый потенциометр предназначен для работы с термометром заданной градуировки (ХА, ХК и др.).

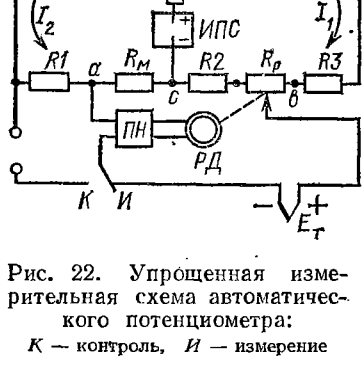


Рис. 22. Упрощенная измерительная схема автоматического потенциометра:
К — контроль, *И* — измерение

Автоматический потенциометр работает следующим образом. Возникшая при измерении температуры термоэдс $E_т$ подается в точки *a* и *b* мостовой измерительной схемы. В равновесном режиме она в этих же точках равна и противоположна по знаку напряжению U_{ab} моста, получаемому от ИПС, который включен в другую диагональ моста в точках *c* и *d*. При изменении температуры измеряемой среды возникает разность между термоэдс $E_т$ и на-

стики П-, И- и ПИ-законов регулирования соответствуют характеристикам П-звена, И-звена и этих звеньев, соединенных параллельно. Переходные характеристики законов регулирования приведены на рис. 88.

Возможно построение и более сложных законов регулирования (например, пропорционально-дифференциальный ПД, пропорционально-интегрально-дифференциальный ПИД), если это необходимо для стабилизации технологических параметров.

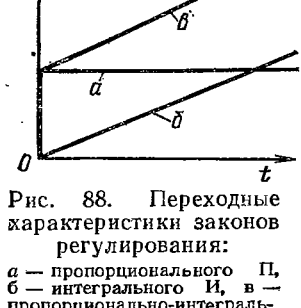


Рис. 88. Переходные характеристики законов регулирования:
а — пропорционального П, *б* — интегрального И, *в* — пропорционально-интегрального ПИ

Контрольные вопросы

1. Что иазывается автоматической системой регулирования и объектом регулирования?
2. Каков принцип действия простейшей системы регулирования?
3. Что называется переходным процессом?
4. Расскажите о замкнутых и разомкнутых АСР.
5. Что понимают под статическими и динамическими характеристиками?
6. Как проявляется свойство самовыравнивания объекта?
7. Перечислите основные типовые динамические звеиья.
8. Что понимают под устойчивостью систем регулирования?
9. Назовите основные законы регулирования.

ГЛАВА X

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

§ 62. Особенности регулирования паровых котлов

Пар для турбин тепловых электрических станций вырабатывается паровыми котлами, которые подразделяют на барабанные и прямоточные. Отличия в конструкции котлов, определяющие их особенности в технологии производства пара, должны учитываться при регулировании технологических параметров. Рассмотрим процесс производства пара в этих котлах.

Технологическая схема барабанного котла показана на рис. 89. Пар в котлах получается за счет передачи теплоты от сжигаемого топлива рабочему телу — воде, в результате чего она нагревается до кипения и ис-

паряется, затем происходит перегрев пара до установленных технологических параметров. Эти стадии преобразования воды в перегретый пар проходят в поверхностях нагрева, которые подразделяют на подогревательные, испарительные и перегревательные.

Система подъемных *3* и опускных *2* труб с барабаном *4* и коллекторами образует циркуляционный контур. Бара-

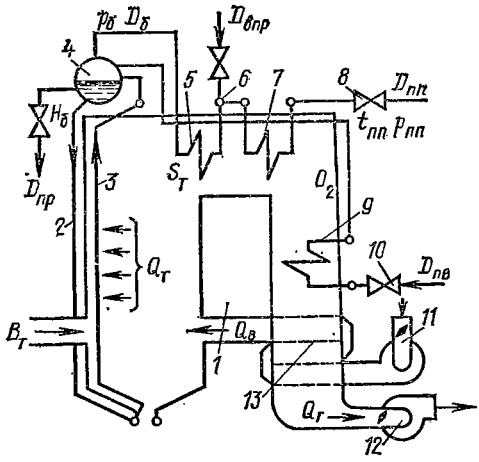


Рис. 89. Принципиальная схема барабанного котла и его основные технологические параметры:

1 — топка, *2* — опускные трубы, *3* — подъемные трубы циркуляционного контура, *4* — барабан, *5, 7* — пароперегреватели, *6* — пароохладитель, *8* — главная паровая задвижка, *9* — водяной экономайзер, *10* — регулировочный питательный клапан, *11* — дутьевой вентилятор, *12* — дымосос, *13* — воздухоподогреватель; $B_т$, $Q_в$ — расход топлива и воздуха; $P_{пр}$, $D_{впр}$, $P_{пв}$ — расход воды на продувку и впрыск, питательной воды, $H_б$, $p_б$, $D_б$ — уровень, давление и расход пара в барабане, $p_{пп}$, $P_{пп}$, $t_{пп}$ — давление, расход и температура перегретого пара, $Q_т$ — количество уходящих газов, $Q_т$ — тепловая нагрузка, O_2 — содержание кислорода в уходящих газах, $S_т$ — разрежение в верхней части топки

бан *4* котла является элементом контура, где совершается парообразование. Он отделяет водяную фазу от паровой.

Топливо и воздух поступают в камеры сгорания через особые горелочные устройства, конструкция которых зависит от вида сжигаемого топлива. Теплота от горячих газов через систему многочисленных теплообменников отбирается питательной водой и идет на парообразование и нагрев пара до заданных параметров. Далее газы по газоходам направляются к дымососу *12* и выбрасываются в атмосферу. В га-

пряжением U_{ab}, вследствие чего на вход электронного усилителя подается напряжение постоянного тока. Далее оно преобразователем напряжения *ПН* преобразуется в напряжение переменного тока и усиливается по мощности для приведения в движение реверсивного двигателя *РД*. При этом двигатель перемещает движок реохорда $R_р$ так, что разность $\Delta U = E_т - U_{ab}$ становится равной нулю, в результате движок реохорда остановится.

Одновременно с движком $R_р$ перемещаются стрелка прибора по шкале и перо по диаграммной бумаге. Продвижение диаграммной ленты осуществляется отдельным синхронным двигателем. Такой способ измерения термоэдс обеспечивает высокую точность, независимость от внешних воздействий, незначительное потребление мощности от термоэлектрического термометра.

Установка термоэлектрических термометров должна обеспечивать минимальную утечку теплоты по их арматуре, поэтому термометры необходимо глубже погружать в измеряемую среду, устанавливать в местах с большой скоростью теплоносителя, улучшающей условия теплообмена с термометром. Для защиты от повреждений, магнитных полей и высоких температур соединительные провода, прокладываемые от термометров к потенциометрам, помещают в стальные заземленные трубы отдельно от силовых проводов.

Щитовые милливольтметры и автоматические потенциометры устанавливают в доступных местах, не подверженных действию вибрации, высоких температур, пыли, влаги и агрессивных газов. Корпуса автоматических потенциометров заземляют.

§ 14. Термометры сопротивления

Для измерения сравнительно невысоких температур (не более 650 °С) часто применяют термометры сопротивления, принцип действия которых основан на свойстве металлов и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. На ТЭС с их помощью измеряют температуру дымовых газов, питательной воды, подогретого и холодного воздуха, угольной пыли, мазута.

При нагреве металлов их сопротивление увеличивается в виде следующей линеаризованной зависимости $R_t = R_0(1 + \alpha t^\circ)$, где R_t и R_0 — сопротивления термометра при тем-

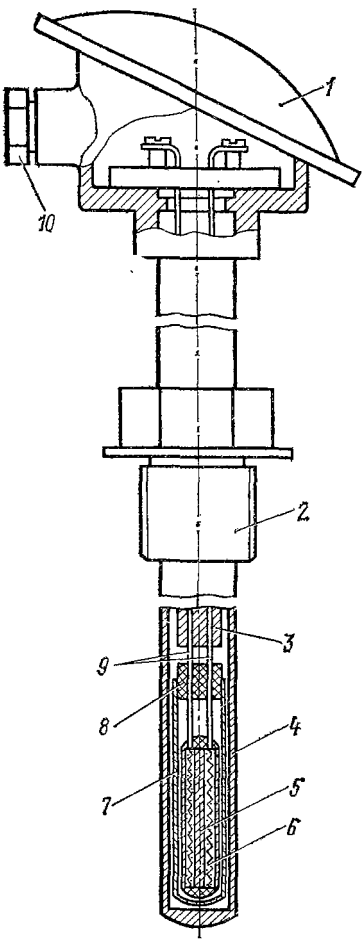


Рис. 23. Устройство термометра сопротивления:
1 — головка, *2*, *10* — штуцера, *3* — трубка, *4* — чехол, *5* — каркас, *6* — спираль, *7* — защитная оболочка, *8* — втулка, *9* — выводы

пературе $t°$ и 0 °С; α — коэффициент температурного сопротивления.

Материалы, применяемые в термометрах сопротивления, должны обладать стабильностью и воспроизводимостью градуировочной характеристики.

Наибольшее распространение получили термометры сопротивления, чувствительный элемент которых изготовляют из платины и меди. Платиновые термометры сопротивления (ТСП) служат для измерения температур от —260 до +1100 °С. Градуировочные характеристики ТСП (зависимость сопротивления от температуры) нелинейны. Они задаются в виде таблиц и имеют три модификации, обозначаемые 20, 21, 22. Номинальные сопротивления термометров ТСП могут быть 10, 46, 100 и 500 Ом. Недостаток ТСП — повышенная чувствительность к различным веществам в восстановительной среде.

Медные термометры сопротивления (ТСМ) служат для измерения температур от —200 до +200 °С. Их градуировочные характеристики имеют две модификации, обозначаемые 23 и 24. Номинальные сопротивления этих термометров при $t°$=0 °С могут быть 10, 50 и 100 Ом. Статические характеристики ТСМ отличаются от ТСП более высоким температурным коэффициентом. Недостаток ТСМ — невысокое удельное сопротивление и окисляемость при высоких температурах.

По устройству термометры сопротивления (рис. 23)

зоходах устанавливают теплообменники: пароперегреватели *5* и *7*, экономайзеры *9* и воздухоподогреватели *13*.

Таким образом возрастает процент использования теплоты органического топлива, а следовательно, и кпд котла.

Прямоточный котел (рис. 90) отличается по конструкции от барабанного. В этом котле можно достичь сверхкритических параметров пара. Особенностями прямоточного котла являются использование однократной циркуляции рабочего тела и отсутствие барабана. Испарительные поверхности *2* котла расположены в нижней части топочной камеры. Топочные экраны размещены по всей поверхности топки в виде пучков параллельно расположенных труб.



Рис. 90. Принципиальная схема пароводяного тракта прямоточного котла:

1 — водяной экономайзер, *2* — испарительные поверхности, *3* — переходная зона, *4* — средняя радиационная часть, *5*, *7* — ступени пароперегревателя, *6* — пароохладитель; $p_{пр}$ — давление пара в промежуточной точке

Так как при выработке пара в данной компоновке отсутствует барабан, то осевшие соли периодически выводятся из переходной зоны *3* котла, расположенной в области умеренных температур. Объем переходной зоны значительно меньше объема барабана, поэтому качество питательной воды по солесодержанию должно быть очень высоким. Прямоточный котел в отличие от барабанного обладает меньшей металлоемкостью, а значит, и меньшей аккумуляцией теплоты в металле и рабочем теле (воде и паре). Эти особенности конструкции определяют и особенности управления прямоточными котлами.

Из-за малой аккумулирующей способности котел очень быстро реагирует на изменения нагрузки, имеет высокую приемистость, т. е. способность быстро «подхватывать» нагрузку. При изменении режимов работы параметры прямоточного котла более чувствительно реагируют на эти изменения.

В прямоточных котлах в отличие от барабанных значительно меньше влияние режима горения на общий тепловой поток в их нижних и верхних радиационных частях.

близки к термоэлектрическим термометрам. Чувствительный элемент термометра выполняют в виде спирали *6* из проволоки, намотанной на каркас *5* из изоляционного материала. Для защиты от внешней среды чувствительный элемент заключен в защитную оболочку *7*, которая уплотнена керамической втулкой *8*. Выводы *9* от чувствительного элемента проходят через изоляционную трубку *3*. Все

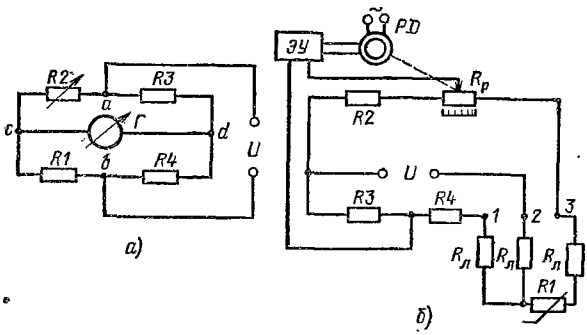


Рис. 24. Схемы уравновешенного моста:
а — упрощенная, *б* — с автоматической компенсацией по трехпроводной схеме включения термометра сопротивления; *1, 2, 3* — контакты для подключения термометра сопротивления

элементы находятся в защитном чехле *4*, который устанавливают на объекте измерения с помощью штуцера *2*. В верхней части защитного чехла размещается головка *1*, в которой имеются электрические выводы термометра для подключения соединительных проводов. Соединительные провода выводятся через штуцер *10*.

Вторичными приборами для термометров сопротивления служат автоматические уравновешенные измерительные мосты или логометры.

Упрощенная схема *уравновешенного* четырехплечего *моста* (рис. 24, *а*) состоит из термометра сопротивления *R1*, включенного в одно из плеч, резисторов *R2*, *R3* и *R4* с заданными сопротивлениями и чувствительного нуль-индикатора *Г*. Резистор *R2* выполняет функции сравнительного регулируемого плеча, изменяя сопротивление которого можно добиться в схеме равновесия. Такое состояние моста может быть только при определенном соотношении между сопротивлениями его плеч: $R1R3=R2R4$. При этом ток в измерительной диагонали $I=0$, что должно фиксироваться нуль-индикатором. Допустим, что сопротивление

термометра $R1$ меняется, тогда при постоянных сопротивлениях резисторов $R3$ и $R4$ изменением сопротивления резистора $R2$ добиваются уравновешивания моста, при котором $I=0$ и $R1=K/R2$, где K — отношение постоянных сопротивлений моста. В этом случае напряжение питания на результат измерения сопротивления термометра не влияет.

Рассмотрим схему автоматического уравновешенного измерительного моста КСМ (рис. 24, *б*). Принцип действия этого прибора, как и автоматических потенциометров, основан на компенсационном методе измерения. Если в процессе измерения температуры возникает небаланс моста, электрический сигнал из его диагонали поступает на вход электронного усилителя *ЭУ*, а затем на реверсивный двигатель *РД*, который перемещает движок реохорда $R_р$ до тех пор, пока не наступит равновесие моста. Зависимость перемещения движка $R_р$, соединенного с указателем шкалы, от изменения сопротивления термометра — линейная.

Во избежание влияния изменения сопротивления соединительных проводов резистора $R_л$ на показания прибора применяют трехпроводную схему присоединения термометра сопротивления к мосту. При этом способе сопротивления проводов оказываются включенными в разные плечи моста. Двухпроводная схема присоединения такими преимуществами не обладает. В настоящее время выпускают уравновешенные измерительные мосты КВМ, КПМ, КСМ с цифровой шкалой градуирования.

Кроме мостовых схем для работы в комплекте с термометрами сопротивления используют логометры, принцип действия которых основан на измерении отношения токов в двух противодействующих рамках, помещенных в магнитное поле (рис. 25, *а*). В электрическую цепь одной из рамок включен термометр сопротивления R_t, а в цепь другой — постоянный резистор $R1$. Обе рамки логометра получают питание от одного источника постоянного напряжения. В каждой рамке из-за взаимодействия электрического тока и внешнего магнитного поля возникает вращающий момент. Направление тока в обеих рамках выбрано таким, что их вращающие моменты противодействуют друг другу, при этом угол поворота подвижной системы логометров оказывается пропорциональным отношению электрических токов I_1 и I_2 в рамках. Равновесие в подвижной системе достигается благодаря тому, что рамка с большим током перемещается в область с меньшей маг-

Поскольку прямоточные котлы работают при сверхкритических параметрах, где исчезает разность между плотностью воды и пара, то качество питательной воды должно приближаться к качеству вырабатываемого пара. Кроме того, в прямоточных котлах используется вторичный перегрев пара, что повышает общее теплоиспользование.

Для правильной оценки свойств котлов как объектов управления рассмотрим особенности их работы.

В барабанном котле (см. рис. 89) отклонение параметров от заданных может происходить как при изменении нагрузки котла, так и под воздействием других факторов.

Увеличение нагрузки вызывает повышенное потребление пара турбинами, что приводит к снижению давления в барабане *4* и паропроводах. Для восстановления давления необходимо увеличить подачу топлива, а значит, и воздуха, т. е. поддерживать оптимальное соотношение топливо — воздух, при этом изменяется тепловой режим как по газовоздушному тракту, так и по пароводяному.

Таким образом, поддержание нагрузки связано с регулированием давления пара, где регулирующим воздействием является изменение подачи топлива. Котел должен иметь регулятор тепловой нагрузки (РТН). Для обеспечения минимума потерь при сжигании топлива необходим также регулятор экономичности горения, поддерживающий заданное соотношение топливо — воздух изменением потока воздуха от дутьевого вентилятора. Подача питательной воды должна соответствовать расходу вырабатываемого пара. Промежуточным звеном между паром и водой служит барабан. Заданный уровень воды в барабане котла определяет не только это соответствие, но и его безаварийную работу, поэтому уровень $H_б$ следует регулировать, воздействуя на регулировочный питательный клапан (РПК). Продукты сгорания (в виде топочных газов) выводятся через дымовую трубу, при этом в котле должна поддерживаться определенная степень разрежения $S_т$ в верхней части топки, что предохраняет от выброса продуктов сгорания в помещение. Топочные газы отсасываются дымососами. Оставшиеся после парообразования соли выводят из барабана непрерывной продувкой через продувочный клапан.

Конструктивные особенности прямоточного котла определяют и его свойства как объекта управления. При отсутствии барабана граница между водой и паром может изменяться в зависимости от паропроизводительности, количества подводимой теплоты и расхода питательной воды. Это приводит к довольно резким температурным изменениям

нитной индукцией (соответствующей большему воздушному зазору между сердечником и полюсами магнита), а рамка с меньшим током — в область с большей магнитной индукцией.

Измерительная схема *логометра* Л-64 построена на основе симметричного неуравновешенного моста (рис. 25, *б*). Он образован постоянными резисторами *R1*, *R2*, *R3*, *R4* и *R5* и получает питание от источника постоянного тока. В одно из плеч моста включен по трехпроводной схеме термометр сопротивления R_t. Медный резистор $R_м$ пред-

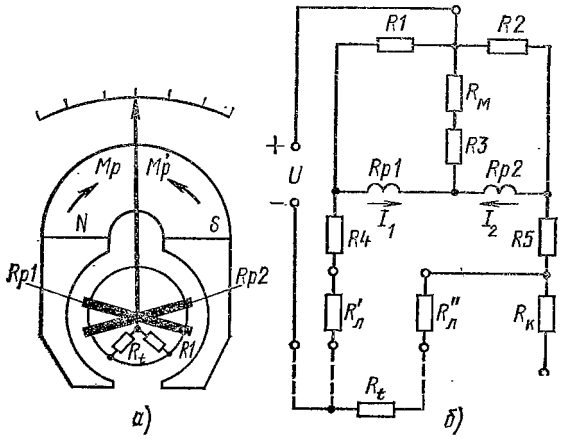


Рис. 25. Устройство магнитоэлектрического логометра (*а*) и его измерительная схема (*б*)

назначен для температурной компенсации. При измерении температуры показания термометра R_t меняются, возникает разбаланс моста, в результате чего ток в одной рамке увеличивается, а в другой уменьшается. Это приводит к повороту рамки и стрелки логометра. Поскольку показания логометра зависят от напряжения питания, в схеме предусмотрен контрольный резистор $R_к$. В режиме контроля его сопротивление равно сопротивлению термометра при температуре, отмеченной на шкале логометра красной чертой. Если стрелка не останавливается на контрольной черте, необходимо с помощью реостата изменять сопротивление цепи, добиваясь правильности контроля.

Рабочие логометры, применяемые на ТЭС, выпускаются классом точности 1,5. Их изготовляют различной кон-

и отклонениям давления на выходе из котла, что определяет выбор регуляторов питания (РП) и топлива (РТ) в качестве основных. Усложняется регулирование температуры пара, так как возрастает влияние расхода питательной воды и топлива. Таким образом, в прямоточных котлах должно поддерживаться более жесткое соотношение между водой и топливом. Схемы регулирования подачи топлива и воздуха и удаление топочных газов могут быть аналогичны таким же схемам в барабанных котлах.

§ 63. Основные функции управления тепловыми процессами

Тепловое оборудование современных мощных промышленных предприятий представляет сложный комплекс, состоящий из основного оборудования технологического цикла и вспомогательных агрегатов, обеспечивающих работу основных установок. На тепловых электрических станциях к основному оборудованию относят котел, турбину, генератор, к вспомогательному оборудованию — системы топливоподачи, подготовки питательной воды, утилизации теплоты. Кроме того, имеется станционное оборудование, которое непосредственно не принимает участия в процессе выработки электроэнергии и теплоты, но используется для общестанционных нужд, например циркуляционная насосная, мазутонасосная, электролизерная и другие системы.

Агрегаты в процессе работы должны функционировать в заданных режимах, поддерживать установленные параметры, поэтому управление таким сложным хозяйством связано с большими трудностями. Получение информации, контроль и регулирование параметров в ходе технологического процесса осуществляются рядом подсистем, позволяющих поддерживать оптимальный режим работы.

По назначению все подсистемы подразделяют на две большие группы: информационные и управления. Информационная подсистема включает в себя индивидуальный контроль, контроль по вызову, массовый контроль и сигнализацию. Подсистема управления выполняет функции дистанционного управления, автоматического регулирования технологических параметров, логического управления, защиты и блокировки агрегатов. Схема функций управления на ТЭС приведена на рис. 91, в которой показаны основные связи между объектом и системами управления, а также оператором. Рассмотрим назначение каждой из подсистем управления.

струкции в комплекте с термометрами сопротивления. Приборы имеют круглые и профильные шкалы с цифровой градуировкой.

§ 15. Пирометры

В рассмотренных ранее термометрах (термометры расширения, термоэлектрические, сопротивления) предусматривается непосредственный контакт между их чувствительным элементом и измеряемой средой. Верхний предел таких контактных методов измерения ограничивается температурой 1800 °С. Для определения более высоких температур без непосредственного контакта термометров с измеряемой средой применяют пирометры, которые на ТЭС служат для измерения температуры в топке котла.

Из курса физики известно, что все нагретые тела излучают электромагнитные волны различной частоты. С ростом температуры увеличивается как частота волн излучения, так и их интенсивность (пропорционально температуре тела T^4, К). Это свойство используется при измерениях температур нагретых тел. Однако разные физические тела, будучи нагретыми до одной и той же температуры, обладают неодинаковой интенсивностью излучения, связанной с их индивидуальными физико-химическими свойствами. Наиболее хорошо изучены законы излучения абсолютно черного тела, которое реально в природе не существует и является математической абстракцией. Такие тела при заданной температуре обладают максимальной интенсивностью излучения и могут служить эталоном для различных физических тел. Поэтому шкалы пирометров градуируются по излучению абсолютно черного тела. Так как все физические тела излучают меньшую энергию, чем черное тело, пирометры показывают температуру более низкую, чем действительная температура нагретого тела.

По принципу действия различают пирометры оптические (монохроматические) и радиационные (полного излучения). В *оптических пирометрах* сравнивается яркость излучения определенной длины волны нагретого тела, температура которого измеряется, и накала нити специальной фотометрической лампы, встроенной в прибор. Сравнение интенсивностей происходит после пропускания излучения обоих тел через красный светофильтр. Схема оптического пирометра с исчезающей нитью показана на рис. 26.

Приборы непрерывного измерения предназначены для индивидуального контроля наиболее важных параметров технологического цикла и визуального наблюдения за их изменениями. Для наиболее важных измеряемых параметров введена регистрация их отклонений с непрерывной записью на самопишущих приборах. Анализ результатов изменения параметров позволяет устанавливать причины возникновения аварийных ситуаций и ход развития ава-

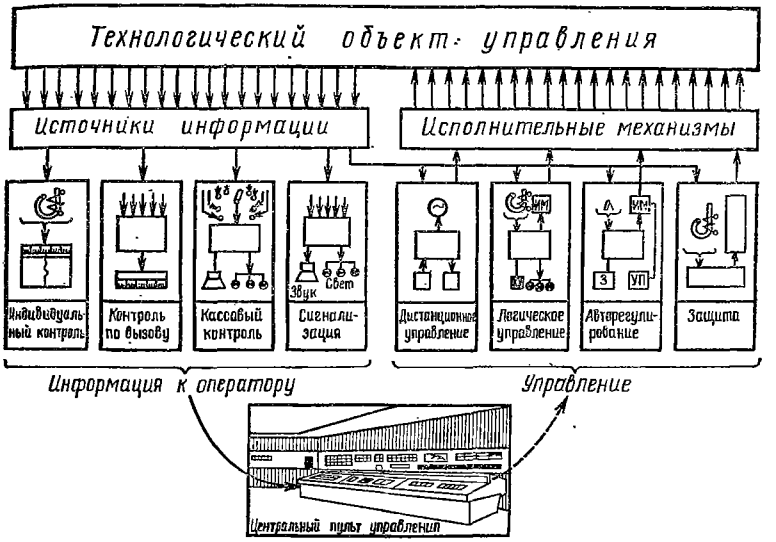


Рис. 91. Схема функций управления тепловыми процессами

рий, оценивать экономичность технологических процессов за длительный период эксплуатации.

Для измерений теплотехнических параметров используют датчики и приборы общепромышленного назначения, точность которых регламентируется правилами Госатомэнергонадзора. Наибольшее количество параметров контролируется по температуре пара, питательной воды и металла оборудования.

Измерения по вызову позволяют периодически контролировать установленные параметры. Обычно этот контроль осуществляется для менее ответственных параметров, например, температуры разрежения в газовых трактах, уровня пыли в промышленных бункерах, контроля состояния паропроводов и др.

При измерении наводят объектив *6* прибора на объект измерения *7*, при этом фокусируется излучение на нить накала фотометрической лампы *5*. Оператор, измеряющий температуру тела, через линзу *1* и красный светофильтр *2* наблюдает за изображением нити на фоне поверхности нагретого тела, добиваясь одинаковой яркости излучения нити и тела регулированием (реостатом *3*) тока, проходящего через нить лампы от источника питания *4*. Если яркость нити меньше, чем яркость излучения тела, нить кажется черной на светлом фоне и, наоборот, если яркость нити больше, чем яркость излучения тела, она будет светлой линией на более темном фоне. При совпадении яркостей изображение нити сольется с фоном излучения тела и она



Рис. 26. Схема оптического пирометра с исчезающей нитью накала:
1 — линза, *2* — светофильтр, *3* — реостат, *4* — источник питания, *5* — лампа, *6* — объектив, *7* — объект измерения

будет невидима измерителю. В этом случае по шкале миллиамперметра *A* определяют температуру тела. Рассмотренные пирометры относят к визуальным приборам. Существует другой тип оптических пирометров — фотоэлектрические ФЭП, выпускаемые классом точности 1. В них яркостные температуры объекта и нити сравниваются фотоэлементами или фотосопротивлениями, а измерение выполняется потенциометрами БП.

Действие *радиационных* (*полного излучения*) *пирометров* основано на фокусировке теплового излучения тела с помощью телескопа стандартного типа (например, ТЕРА) в месте рабочих спаев термобатареи, установленной в нем. Возникающая термоэдс поступает на вторичный прибор — милливольтметр или автоматический потенциометр, при этом градуировка телескопа должна соответствовать градуировке вторичного прибора. Телескоп ТЕРА радиационного пирометра РАПИР может работать в комплекте с

В современных котлах один показывающий прибор может обслуживать группу первичных приборов. Оператор в установленное время проводит «опрос» всех параметров, что дает дополнительную информацию по управлению технологическим циклом.

Массовый, или множественный, контроль предназначен для контроля однотипных параметров агрегатов, при этом из опыта эксплуатации известно, что в процессе работы вероятность отклонения этих параметров от заданных значений довольно мала. Для массового контроля (например, контроль температур подшипников вращающихся механизмов) характерно использование приборов с обегающими устройствами, связанными с системами сигнализации.

Технологическая сигнализация предназначена для оповещения оперативного персонала о недопустимых отклонениях режимных параметров или неисправности основного и вспомогательного оборудования или аппаратуры. Сигнализация охватывает все виды управления, начиная от наиболее важных параметров и кончая отдельными устройствами и механизмами.

При срабатывании сигнализации на щит оператора подается звуковой сигнал и включается световое табло. Звуковая сигнализация бывает двух тонов: предупредительная (звонок) и аварийная (сирена). Световой сигнал подается на отдельные табло, которых на щите управления довольно много. Чтобы облегчить работу оператора, вновь поступивший сигнал выделяется прерывистым свечением до тех пор, пока не будет принят оператором. Для технической сигнализации предусмотрено раздельное отключение звукового сигнала и прерывистого мигания. Схемы сигнализации должны быть надежны.

Дистанционное управление предназначено для непосредственного управления электроприводами задвижек, вентилей и запорной арматуры с пульта оператора. Каждый сигнал управления имеет отдельный канал связи. По способу управления различают индивидуальное и групповое управление. При индивидуальном управлении на каждый объект устанавливают отдельный орган управления — ключ или кнопку. Групповое управление применяют для объектов, связанных общей технологией и одновременным управлением. При групповом управлении на объект устанавливают общий ключ управления, команда от которого через релейную схему размножается на отдельные управляемые объекты.

Операции, выполняемые оператором при дистанционном

любым автоматическим потенциометром в диапазоне от 600 до 2000 °С.

Расстояние телескопа до объекта измерения составляет от 1 до 1,4 м. Большое значение имеют наведение и фокусировка телескопа на объект измерения, чтобы видимые через окуляр рабочие концы термобатареи совпадали с источником излучения. В радиационных пирометрах по сравнению с оптическими отсутствует источник питания, но возможна дистанционная передача измеряемого сигнала, при этом точность измерения температуры у них ниже.

Контрольные вопросы

1. Когда стеклянные термометры применяют в металлических оправах?
2. Почему в жидкостных манометрических термометрах термобаллон должен размещаться на одном уровне с манометрической пружиной?
3. Что такое градуировочная характеристика термоэлектрического термометра?
4. Из чего изготовляют компенсационные провода при измерении температуры термоэлектрическим термометром?
5. Зачем нужно устройство КТ-54?
6. Какие вторичные приборы применяют при измерении температуры термометрами сопротивления?
7. По какой температуре градуируются радиационные пирометры?

ГЛАВА III

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ПОКАЗАНИЙ И ВТОРИЧНЫЕ ПРИБОРЫ

§ 16. Общие сведения

Количественный рост контролируемых величин потребовал создания информационно-измерительной системы как важнейшей части человеко-машинного комплекса для управления современным энергоблоком ТЭС (АСУТП). Управление осуществляется оператором с блочного щита (БЩУ), где устанавливают вторичные приборы, измеряющие большинство теплотехнических параметров энергоблока. Вторичные приборы связаны с чувствительными элементами первичных преобразователей линиями связи.

В первичных преобразователях чаще всего происходит превращение измеряемых величин в измерительный сигнал другой физической природы. Например, при термо-

управлении, должны быть простыми и исключать ошибочные действия. Операция включения — выключения обеспечивается световой сигнализацией, информирующей оператора о состоянии запорной арматуры. Схемы унифицированы и составляются из простых узлов. При выполнении сложных функций управления, например операций пуска электронасоса, последовательность отдельных операций осуществляется по заданному алгоритму включением кнопки или ключа.

Схемы логического управления, выполняемые на элементах логики, предусматривают возможность автоматического вмешательства в ведение технологического режима. В последнее время схемы логического управления строят с использованием тиристоров, обладающих высоким быстродействием, возможностью пропускать большие токи, имеющих малое падение напряжения в проводящем направлении, высокую надежность и малые габаритные размеры. Особенно широко логическое управление применяют в схемах пуска — останова агрегатов, где цепочка командный сигнал — логическое устройство — исполнительный механизм действует автоматически.

Автоматическое регулирование является непрерывным и предназначено для стабилизации технологических параметров на заданном уровне, обеспечения установленной мощности, надежной и экономичной работы установки. Работа автоматических систем управления зависит от динамических характеристик объектов, характеристик регулирующих приборов, качества исполнительных механизмов и регулирующих органов. Схемы автоматического регулирования должны работать в широком диапазоне нагрузок, что вызывает дополнительные требования как к качественному составу аппаратуры автоматики, так и к построению схем регулирования.

Технические средства непрерывного автоматического регулирования все время совершенствуются, и растет надежность управления такими сложными агрегатами, как котел, турбина, вспомогательное оборудование.

Основные регулируемые параметры для контроля записываются, что позволяет анализировать ход процессов регулирования, уточнять настройку регуляторов, повышать качество регулирования и эффективность работы оборудования.

Действие *защит и блокировок* рассчитано не на нормальный режим эксплуатации оборудования, а на предаварийное и аварийное состояние установок. Оператор при этом вносит

электрическом способе измерения температуры на выходе термометра получаем электрический сигнал, который удобно передавать на большие расстояния к месту, где располагается вторичный прибор. Та же ситуация имеет место при измерениях температуры термометрами сопротивления.

Однако при измерениях, например давления, уровня, расхода вещества, чувствительный элемент первичного преобразователя преобразует измеряемые параметры в перемещение или другую физическую величину, которую невозможно передать вторичному прибору. Поэтому необходимо устанавливать промежуточный преобразователь, который преобразовывает (желательно линейным образом) измеряемую величину в сигнал, удобный для дистанционной передачи. Такими сигналами являются электрические и пневматические. Кроме преобразования измеряемых величин требуется унификация параметров сигналов на выходе таких средств измерений, что обеспечивает взаимозаменяемость передающих преобразователей, вторичных приборов, сокращает их номенклатуру, повышает надежность линий передачи, расширяет возможности применения вычислительной техники. Это требование касается также и электрических сигналов от термометров. Унификация параметров измерительных сигналов позволяет построить автоматизированную систему централизованного контроля (АСЦК) и управления (АСУ) современных энергоблоков.

В настоящее время существует система преобразователей и приборов ГСП с унифицированным сигналом постоянного электрического тока, который меняется в зависимости от измеряемого параметра. Достоинством передачи сигнала постоянным током является устранение влияния паразитной индуктивности и емкости линий связи, в результате чего повышается их помехоустойчивость и обеспечивается бо́льшая протяженность.

§ 17. Нормирующие измерительные преобразователи

Нормирующие преобразователи предназначены для преобразования сигналов от термоэлектрических термометров, датчиков эдс и термометров сопротивления в унифицированные сигналы постоянного тока. Рассмотрим принцип действия таких преобразователей на примере ПТ-ТП-68 (в комплекте с термоэлектрическими термометрами) и ПТ-ТС-68 (в комплекте с термометрами сопротивления).

Упрощенная схема ПТ-ТП-68 показана на рис. 27. Преобразователь состоит из корректирующего моста, уси-

лишь необходимые коррективы в работу автоматики и отдельных агрегатов.

Нарушения в работе технологического режима могут быть значительными, что влечет за собой выход из строя как основного, так и вспомогательного оборудования. В зависимости от характера возмущений системы защиты производят переключения в схемах, включение резервного оборудования, отключения отдельных агрегатов, перевод в другие режимы эксплуатации.

Схемы защит выполняются на элементах логики, при этом обеспечивается надежное функционирование их, исключается вероятность отказов и ложных включений. Системы защиты изготовляются независимыми от других систем управления: имеют собственные первичные приборы, датчики контроля, независимые каналы управляющих воздействий и резервирование. Перевод всех агрегатов и механизмов в нормальное состояние после срабатывания защит осуществляется только после выяснения и устранения причин, вызвавших их срабатывание, что позволяет предотвратить повторное возникновение аварийной ситуации. Если срабатывает несколько защит, вызывающих разную разгрузку оборудования, приоритет отдается защите, создающей бо́льшую степень разгрузки.

§ 64. Автоматизированные системы управления технологическими процессами на ТЭС

Рост единичных мощностей современных блоков и работа их как в базовых, так и регулирующих режимах ведет к усложнению задач в области организации управления. В этих условиях возрастает не только число контролируемых запорных и регулирующих органов (до 2000 на блоке), но и повышаются требования к технологическому процессу по производству электрической и тепловой энергии. Кроме того, блок в различных режимах (в том числе и пуски-остановы) работает при значительных неконтролируемых внешних воздействиях, вызванных колебаниями электрической нагрузки, неравномерностью горения твердого топлива, изменением характеристик оборудования. При этом возрастает напряженность труда эксплуатационного персонала и снижается эффективность работы оборудования.

Внедрение автоматизированных систем управления тепловыми процессами (АСУ ТП) на ТЭС позволяет подойти к технологическому процессу как единому целому. АСУ ТП удерживают процесс в оптимальном режиме, освобождают

лителя с токовым выходом $I_{вых}$ и устройства обратной связи, куда входит усилитель *УОС* и резистор $R_{ос}$. Три резистора моста *R1, R2, R3* выполнены из манганина, а четвертый $R_м$ — из меди. Последний служит для компенсации изменений температуры свободных концов термоэлектродных проводов и располагается вблизи них. Входной сигнал от термоэлектрического термометра E_t подается в диагональ моста *ab*, где сравнивается с напряжением обратной связи $U_{ос}$. Сигнал небаланса моста $\Delta U = E_t - U_{ос}$ подается на усилитель, который преобразует его в сигнал постоянного тока от 0 до 5 мА в зависимости от значения измеряемой величины E_t. Этот сигнал посту-

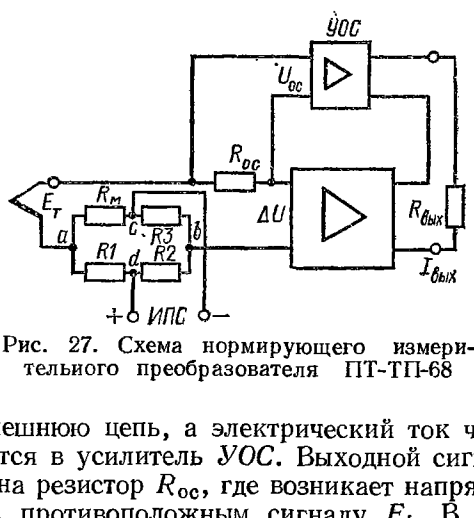


Рис. 27. Схема нормирующего измерительного преобразователя ПТ-ТП-68

пает во внешнюю цепь, а электрический ток через делитель подается в усилитель *УОС*. Выходной сигнал с *УОС* поступает на резистор $R_{ос}$, где возникает напряжение $U_{ос}$ со знаком, противоположным сигналу E_t. В результате происходит полная автокомпенсация измеряемого сигнала E_t напряжением $U_{ос}$, которое пропорционально унифицированному выходному сигналу преобразователя.

Схема преобразователя ПТ-ТС-68 строится по тому же принципу, что и схема предыдущего преобразователя. Имеется измерительный мост, в одно из плеч которого включен термометр сопротивления R_t. Изменение сопротивления термометра R_t приводит к разбалансу моста и появлению в его измерительной диагонали напряжения постоянного тока $U_м$, которое далее подается на усилитель постоянного тока. На выходе последнего возникает унифицированный сигнал $I_{вых}$, передаваемый во внешнюю цепь и одновременно на усилитель обратной связи. На мост поступает напряжение обратной связи $U_{ос}$, проти-

оперативный персонал от многочисленных, но второстепенных операций контроля и управления, чтобы сосредоточить внимание на решении главных задач управления по обеспечению заданного графика нагрузки и минимума энергетических потерь.

Для успешного ведения технологического процесса и выработки определенной стратегии управления необходимо иметь модель процесса, по которой возможно выполнять расчеты, требуемые для определения оптимальных управляющих воздействий. Управляющие воздействия рассчитываются ЭВМ по программе, называемой *алгоритмом управления*. Управляющие воздействия реализуются с помощью исполнительных механизмов, действующих на регулирующие клапаны, задвижки и т. д.

Модель процесса, алгоритмы управления, измерение режимных параметров, элементы управления в комбинации со средствами АСУ входят в АСУ ТП.

Основным элементом АСУ ТП является управляющая цифровая вычислительная машина УВМ, которую упрощенно можно представить в виде пяти основных устройств (рис. 92):

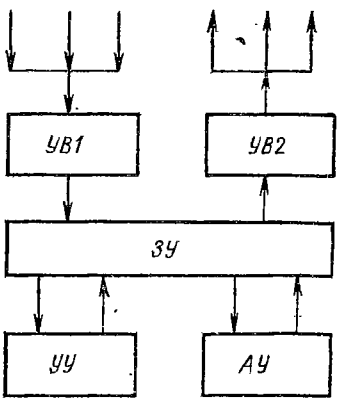


Рис. 92. Упрощенная схема УВМ:

УВ1, *УВ2* — устройства ввода и вывода, *ЗУ* — запоминающее устройство (команды и данные), *УУ* — устройство управления, *АУ* — арифметическое устройство

запоминающее устройство, являющееся местом хранения исходных данных и команд, определяющих поведение вычислительной системы;

устройство управления, обеспечивающее принятие системой логических решений и выбор арифметических операций;

арифметическое устройство, позволяющее выполнять операции сложения, вычитания, умножения, деления и сравнения;

устройство ввода, обеспечивающее ввод в память программы и данных, обрабатываемых системой (постоянных коэффициентов, измеряемых параметров), в виде сигнала оператора от клавишей пишущей машинки, цифрового ко-

Таблица 6. **Измерительные (промежуточные) преобразователи, выполненные в виде отдельных устройств**

Преобразователи	Диапазон измеряемой величины		Класс точности	Тип	Первичный преобразователь (входная цепь)	Вторичный прибор (выходная цепь)
	входной	выходной				
Нормирующие измерительные	Эдс и термоэдс 6—53 мВ	Постоянный ток 0—5 мА	0,6; 1; 1,5	ПТ-ТП-68, НП-ТЛ1-М	Термоэлектрические термометры ТПП, ТПР, ТХА, ТХК	Миллиамперметры, вольтметры КСУ Устройства связи объекта с информационно-вычислительной машиной ИВМ
	То же, 0—45 мВ	Частота 4—8 кГц	1	ПНС-Т		
	Активное сопротивление 7,9—335 Ом	Постоянный ток 0—5 мА	0,6; 1	ПТ-ТС-68, НП-СЛ1-М	Термометры сопротивления ТСП, ТСМ	
	То же, 7,9—385 Ом	Частота 4—8 кГц	1	ПНС-Р		

да, образующегося в результате преобразования напряжения, которое служит сигналом от датчика, и т. д.;

устройство вывода, обеспечивающее вывод из памяти результатов вычислений, применяемых для непосредственного управления или рекомендаций оператору.

Применяемые на блоках АСУ ТП по назначению и рабочим режимам условно можно разделить на четыре группы:

АСУ ТП, работающие в режиме сбора данных. Параметры, интересующие персонал, преобразовываются в цифровую форму, воспринимаются системой ввода и помещают-

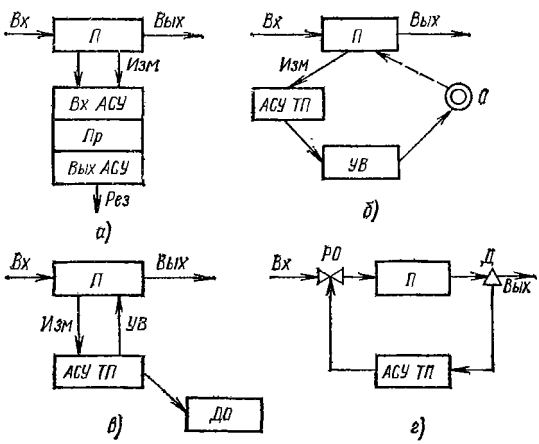


Рис. 93. Режимы работы АСУ ТП:

а — сбора данных, *б* — советчика, *в* — периодических подключений, *г* — непосредственно цифрового управления; *Вх, Вых* — вход, выход, *П* — процесс, *Пр* — процессор, *О* — оператор, *УВ* — управляющее воздействие, *ДО* — данные обработки (журналы, отчеты, данные анализов), *РО* — регулирующий орган, *Д* — датчик

ся в ЗУ. При необходимости оперативный персонал может обратиться к этим данным (рис. 93, *а*);

АСУ, работающие в режиме советчика. При этом выходы АСУ не связаны с органами управления процессом, а управление осуществляет оператор. В этом случае на АСУ ТП через заданные промежутки времени поступают сигналы о выбранных параметрах. Результаты в печатном виде передаются оператору. В свою очередь оператор управляет процессом в соответствии с рекомендациями, вырабатываемыми АСУ (рис. 93, *б*);

АСУ, работающие в режиме периодического подключения. В этом режиме АСУ обращаются к автоматическим системам регулирования, связанным непосредственно с отдель-

Продолжение табл. 6

Преобразователи	Диапазон измеряемой величины		Класс точности	Тип	Первичный преобразователь (входная цепь)	Вторичный прибор (выходная цепь)
	входной	выходной				
Механо-электрические	Перемещение чувствительного элемента 0—4 мм	Постоянный ток 0—5 мА	1	МПЛ	Дифманометры и манометры с упругим чувствительным элементом	
Пневмо-электрические	Унифицированный сигнал давления воздуха 0,02—0,1 МПа	Сигнал переменного тока 0—2 В; 1—3 В либо 0—10 МГн	1	ПЭ	Пневматические измерительные приборы	Автоматические приборы с дифференциально-трансформаторной схемой КПД, КСД, КВД, ВМД
Электро-пневматические	Постоянный ток 0—5 мА	Давление воздуха 0,02—0,1 МПа	0,6	ЭП	Приборы с унифицированным токовым сигналом	Устройства пневмоавтоматики

Примечание. Аналогоцифровые АЦП и цифро-аналоговые преобразователи ЦАП поставляются совместно с информационно-вычислительными машинами ИВМ.

ными локальными технологическими процессами. При этом возможно выполнение двух задач управления: автоматической коррекции заданных значений регулируемых параметров и автоматической коррекции работы регуляторов. Функции оператора сводятся к наблюдению за ходом процесса, его вмешательство требуется лишь при возникновении аварийных ситуаций (рис. 93, *в*);

АСУ, работающие в режиме непосредственного цифрового управления. Это позволяет исключить из системы управления аналоговые регуляторы. Управляющие воздействия формируются в АСУ и поступают на регулирующие органы (рис. 93, *г*).

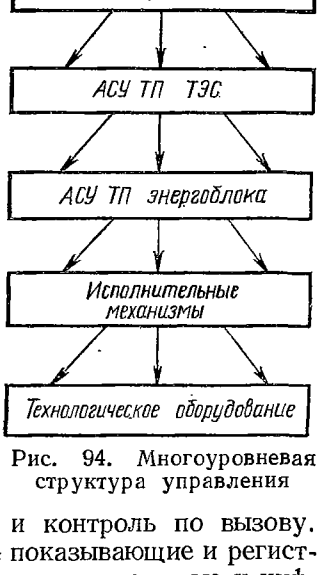


Рис. 94. Многоуровневая структура управления

Управление современными предприятиями можно представить как многоуровневую структуру. В пределах каждого уровня управление осуществляется с учетом требований технологии и информации (команд) верхнего уровня. Такой принцип построения систем называют *многоуровневым* (рис. 94).

К информационным функциям АСУ ТП энергоблока относят:

оперативный контроль заданных технологических параметров, избирательный контроль и контроль по вызову. При этом используют как штатные показывающие и регистрирующие приборы, так и специальные аналоговые и цифровые приборы;

технологическая сигнализация параметров и состояние запорных и регулирующих органов;

расчет технико-экономических показателей ТЭП (он ведется в режиме реального времени с технологическим процессом по текущим параметрам). Оператор на основе этой информации может воздействовать на процесс для получения оптимальных показателей;

определение достоверности информации на основе дополнительного контроля важнейших параметров;

диагностика состояния оборудования на основе оценки текущих и установленных параметров за определенный промежуток времени;

воположное по знаку напряжению $U_м$. Напряжение $U_{ос}$ пропорционально значению сигнала $I_{вых}$ и полностью компенсирует напряжение $U_м$. Термометр сопротивления подключают к измерительному мосту по трехпроводной схеме.

Наряду с указанными применяют нормирующие преобразователи НП-ТЛ1-М, НП-СЛ1-М, работающие по такому же принципу. Класс точности этих преобразователей (0,6; 1) зависит от диапазона напряжения на входе (табл. 6).

§ 18. Дифференциально-трансформаторные преобразователи и схемы дистанционной передачи

В некоторых приборах измеряемая величина преобразуется в перемещение чувствительного элемента. Напри-

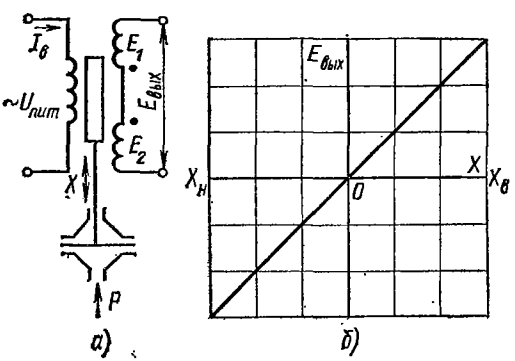


Рис. 28. Схема невзаимозаменяемого дифференциально-трансформаторного преобразователя (*а*) и его градуировочная характеристика (*б*)

мер, прогиб мембраны прибора при измерении давления зависит от его значения. Для преобразования смещения чувствительного элемента прибора в электрический сигнал применяют дифференциально-трансформаторные преобразователи, которые используют в качестве передающих (в первичных приборах) и компенсирующих (во вторичных приборах).

Принцип их действия основан на зависимости взаимной индуктивности между обмоткой возбуждения и вторичной обмоткой трансформатора от положения магнитного сердечника, механически связанного с чувствительным элементом прибора. Схема преобразователя показана на рис. 28, *а*. В первичную обмотку трансформатора подается

регистрация аварийных ситуаций. Информация представляется оператору для анализа причин аварии и принятия решения по дальнейшему предотвращению развития подобных ситуаций.

К функциям управления АСУ ТП энергоблока относят:

поддержание оптимального кпд котла и турбины; сравнивая текущее и расчетное задания кпд, заданной нагрузки блока;

периодическую подстройку параметров настройки регуляторов для получения заданного качества регулирования процессов;

переключение и дискретные операции, предусмотренные при переходе с нагрузки на нагрузку или при изменении состава работающего оборудования, а также операции пуска и останова оборудования.

Внедрение АСУ ТП позволяет повысить эффективность технологических процессов и сократить цикл обработки информации, что достигается поддержанием параметров технологического процесса, близких оптимальным рабочим значениям. Программы АСУ можно легко менять, удерживая в памяти все стадии и циклы технологического процесса и обращаясь к ним при необходимости.

Высокое быстродействие ЭВМ при выполнении арифметических и логических операций позволяет находить управляющие решения со скоростью, значительно превосходящей требования технологических процессов.

Для реализации АСУ ТП требуется выполнить организационное, информационное, математическое, программное и техническое обеспечения.

Организационное обеспечение включает все правила и предписания, которые обеспечивают четкое взаимодействие оперативного персонала, и технических средств в процессе работы. К оперативному персоналу относятся также работники службы эксплуатации технических средств управления.

Информационное обеспечение отражает характеристики и направления информационных потоков в системе. При этом различают входную, выходную и промежуточную информации. Входная информация, кроме поступающей от энергоблока, включает также сигналы и указания от АСУ верхнего уровня.

Математическое обеспечение представляет собой совокупность моделей, математических методов и алгоритмов, используемых для задач управления и обработки информации с помощью средств вычислительной техники.

Программное обеспечение — это совокупность программ, обеспечивающих реализацию всех функций АСУ ТП. Программное обеспечение условно можно разделить на две части: общее — которое поставляется вместе с управляющим вычислительным комплексом (УВК), и прикладное — состоящее из специальных программ для конкретной АСУ ТП.

Техническое обеспечение состоит из совокупности технических средств (устройств), которые обеспечивают реализацию процесса сбора, передачи, обработки и хранения информации, а также связь АСУ ТП с системами высшего уровня управления.

Комплекс технических средств (КТС) целесообразно строить на основе агрегатного принципа, что обеспечивает дальнейшее развитие АСУ ТП, расширение ее функций и удобство эксплуатации.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные параметры регулирования барабанных паровых котлов?
2. Чем отличается прямоточный котел от барабанного?
3. Из каких основных подсистем состоит структура функций управления тепловыми процессами?
4. Что такое подсистема непрерывного измерения технологических параметров?
5. Каковы функции технологической сигнализации?
6. Что такое дистанционное управление теплотехническими установками?
7. Каковы функции технологических защит и блокировок?
8. Что является алгоритмом управления в АСУ ТП?
9. Что входит в программное обеспечение?

ГЛАВА XI

АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ И РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ

§ 65. Общие сведения

По принципу действия и устройству различают регуляторы прямого и непрямого действия. Если регуляторы прямого действия для открытия регулирующего органа используют энергию самого регулятора, то регуляторы непрямого действия — внешние источники.

В настоящее время регуляторы непрямого действия в основном служат как регулирующие приборы, так как обладают достоинствами: позволяют развивать достаточные усилия для перемещения крупных регулирующих органов, имеют высокое быстродействие и могут использоваться для

вторичного прибора зависит от положения сердечника первичного преобразователя. Корректировку нуля *КН* осуществляют с помощью регулируемого резистора *R3*. Исправность прибора контролируют кнопкой *КИ*. При ее нажатии на вход усилителя поступает сигнал только со вторичной обмотки вторичного прибора, при этом стрелка должна стать на его начальную отметку.

Линия связи *ЛС* между первичным и вторичным приборами не вносит дополнительной погрешности, если ее

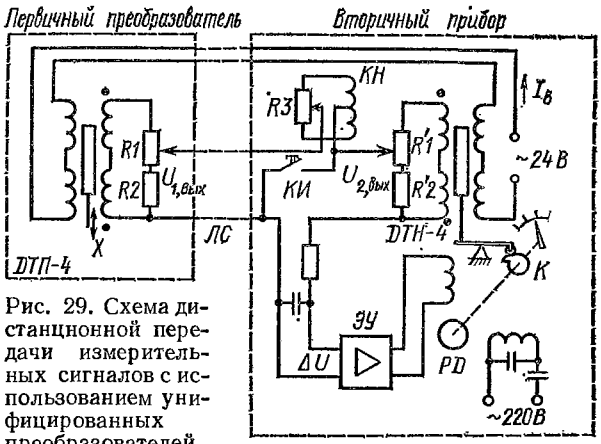


Рис. 29. Схема дистанционной передачи измерительных сигналов с использованием унифицированных преобразователей ДТП

длина не более 250 м. Вторичные приборы, разделяемые на показывающие и самопишущие, выпускаются типов КСД, КВД и КПД.

Невзаимозаменяемые преобразователи ПД используют только в первичных приборах (в мембранных дифманометрах, ротаметрах). Они комплектуются со вторичными приборами, снабженными ферродинамическими преобразователями ПФ-2 (см. § 20).

Приборы с дифференциально-трансформаторными преобразователями просты и надежны в работе, обладают сравнительно высокой точностью показаний. Их шкалы градуируются в единицах индуктивности от 0 до 10 мГц. Недостаток таких преобразователей — возможность подключения к первичному преобразователю только одного вторичного прибора. Дифференциально-трансформаторные преобразователи не относятся к приборам ГСП, поэтому при их работе с информационно-вычислительной машиной ИВМ

регулирования практически всех процессов в теплоэнергетике.

В зависимости от вида источника внешней энергии регуляторы разделяют на электрические, пневматические и гидравлические.

Чтобы понять работу регулятора непрямого действия, рассмотрим структурную схему АСР, показанную на рис. 95. Первичный прибор, или датчик *Д*, передает информацию на измерительную *Изм* и командно-усилительную части регулятора *Рег*, где электрический сигнал рассогласования преобразуется и усиливается до значений, необходимых для управления исполнительным механизмом *ИМ* регулирующего органа *РО*. Задание, т. е. уровень регулируемого параметра, устанавливается с помощью задатчика *Зд*. Кроме указанных элементов регулятор имеет ключ *Кл* для дистанционного управления регулирующим органом при отключении регулятора и указатель положения *УП* регулирующего органа.

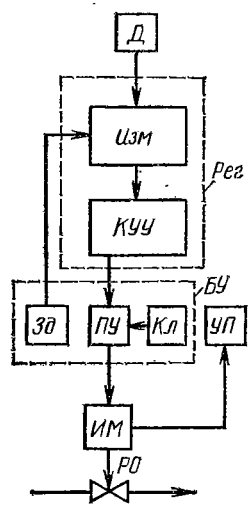


Рис. 95. Схема электронного регулятора:
БУ — блок управления, *ПУ* — переключатель режима управлеиия

В качестве первичных приборов на ТЭС используют термопары, термосопротивления, дифманометры и др.

Первичные приборы должны обладать высокой чувствительностью и малой инерционностью, надежностью и стабильностью выходного сигнала и отвечать другим требованиям, необходимым для обеспечения работы системы регулирования. Основным элементом в регуляторе является командно-усилительное устройство *КУУ*, которое преобразует сигнал измерительного блока до значений, необходимых для управления исполнительным механизмом, и участвует в формировании закона управления регулирующим органом. Рассмотрим принцип действия различных командно-усилительных устройств.

Основным элементом электрических усилителей (рис. 96, *а*) является транзистор. Первичный прибор (датчик) включается между базой *Б* и эмиттером *Э*. Выходное усиленное напряжение $U_{вых}$ снимается с участка между эмиттером *Э* и коллектором *К*. Общей

подключают промежуточные нормирующие преобразователи, преобразующие выходной сигнал переменного тока в унифицированный сигнал постоянного тока. В процессе измерения возникает дополнительная погрешность из-за влияния внешних магнитных полей и соседних линий связи. Преобразователи с магнитной компенсацией лишены этих недостатков.

§ 19. Преобразователи с магнитной компенсацией

Преобразователи с магнитной компенсацией являются передающими и предназначены для выработки унифицированного выходного сигнала постоянного тока в зависимости от линейного перемещения чувствительного элемента первичного прибора.

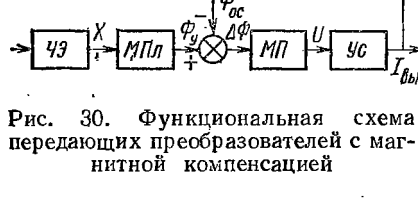


Рис. 30. Функциональная схема передающих преобразователей с магнитной компенсацией

Функциональная схема преобразователя показана на рис. 30. Перемещение упругого чувствительного элемента *ЧЭ* передается магнитному плунжеру *МПл*. При перемещении плунжера изменяется управляющий магнитный поток $\Phi_у$, который в магнитном преобразователе *МП* сравнивают с магнитным потоком обратной связи $\Phi_{ос}$. На выходе *МП* образуется напряжение U, пропорциональное $\Delta\Phi=\Phi_у-\Phi_{ос}$, которое усиливается полупроводниковым усилителем *Ус* (УП-20) и преобразуется в постоянный электрический ток $I_{вых}$ (0—5 мА). Выходной ток $I_{вых}$ поступает в линию дистанционной передачи и в устройство обратной связи *УОС*, где возникает ток обратной связи $I_{ос}$, который создает в *МП* магнитный поток $\Phi_{ос}$, компенсирующий поток $\Phi_у$. При большом коэффициенте усиления *Ус* в прямом канале устройство обратной связи формирует зависимость $I_{вых}=f(X)$, которая может быть линейной (для измерения давления, его разности, уровня) или квадратичной (для измерения расхода по перепаду давления).

Преобразователь с магнитной компенсацией выполнен в виде двух Ш-образных магнитопроводов *3* (рис. 31) и расположенного между ними магнитного плунжера *2*, соединенного с чувствительным элементом прибора. В средней части магнитопроводов размещены магнитные элементы *1*, на которых имеются обмотки возбуждения $W_в$ и обрат-

точкой в этой схеме является эмиттер. При изменении входного сигнала $U_{вх}$ меняются электрическое сопротивление транзистора и выходной сигнал $U_{вых}$. Источник тока $E_к$, питающий коллектор, служит внешним источником энергии. База получает питание от источника тока $E_б$. Схема с электрическими усилителями позволяет одновременно выполнять усиление тока и напряжения.

Для электрических релейных усилителей основным элементом служит электромагнитное

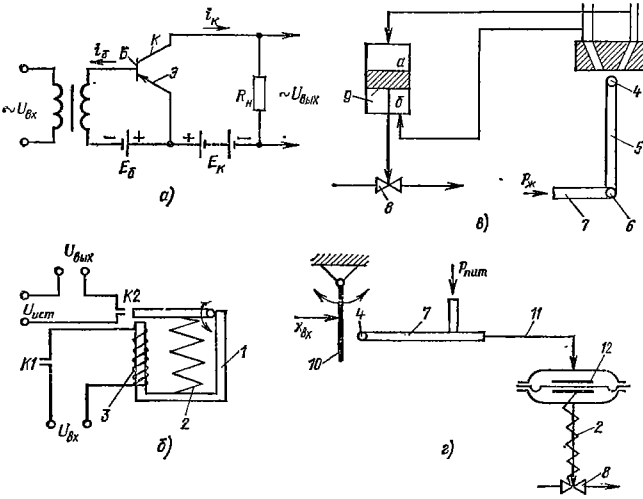


Рис. 96. Схема усилителей:

а, б — электрических (транзисторный и релейный), *в* — гидравлического струйного, *г* — пневматического типа «сопло — заслонка»; *1* — магнитопровод, *2* — пружина, *3* — сигнальная обмотка, *4* — сопло, *5*, *7* — струйные и подводящие трубки, *6* — шарнирное соединение, *8* — регулирующий орган, *9* — поршневой сервопривод, *10* — заслонка, *11* — соединительные линии, *12* — мембранный механизм

реле (рис. 96, *б*). Входное напряжение от первичного источника $U_{вх}$ поступает по сигнальной обмотке *3*, охватывающей магнитопровод *1*, и индуцирует в ней магнитный поток, под действием которого замыкаются контакты реле *K2*. К замкнутой вторичной цепи подводится напряжение $U_{ист}$ от внешнего источника. Если сигнал $U_{вх}$ исчезает, то под действием пружины размыкаются контакты реле *K2* и цепь источника размыкается.

Рассмотрим гидравлический усилитель струйного типа (рис. 96, *в*), который широко применяется в АСР. Основным элементом этого усилителя является струйная трубка *5*, закрепленная шарнирно с подводящими

ной связи $W_{ос}$. В среднем положении плунжера *2* (рис. 31, *а*) магнитные потоки в элементах *1* из-за их разнополярности направлены встречно, а по величине равны. При смещении плунжера (рис. 31, *б*) в обмотках возбуждения появляется управляющий магнитный поток $\Phi_у$, вследствие чего возникает выходной сигнал $I_{вых}$, который одновременно через устройство обратной связи подается в обмотку $W_{ос}$. При этом создаваемый магнитный поток обратной связи направлен навстречу потоку $\Phi_у$ в каждом магнитопроводе.

Достоинства преобразователей с магнитной компенсацией — возможность размножения выходного сигнала, подключения приборов ИВМ с входным сопротивлением

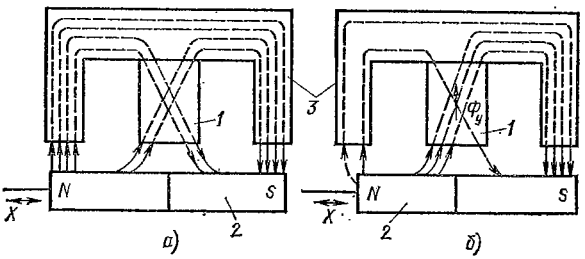


Рис. 31. Образование управляющего магнитного потока в преобразователе до смещения плунжера (*а*) и после его смещения (*б*)

(включая сопротивление линий связи) не более 2,5 кОм. Недостатки их — влияние температуры, внешних магнитных полей, неточность изготовления магнитных элементов преобразователя. В качестве вторичных приборов можно использовать миллиамперметры КПУ, КСУ, КВУ.

Разновидностью преобразователей с магнитной компенсацией являются механоэлектрические передающие преобразователи МП.

§ 20. Ферродинамические преобразователи и схемы дистанционной передачи

Ферродинамические преобразователи предназначены для преобразования угловых перемещений в унифицированный электрический сигнал. Их используют в измерительных устройствах в качестве передающих, компенсирующих или решающих элементов. Поскольку в теплотехнических приборах угловые перемещения чувствительных элементов встречаются редко, ферродинамические преобразователи

импульсными трубками *7* от сигнала первичного прибора. Поворачиваясь под действием струи жидкости в определенное положение, сопло *4* трубки *5* направляет струю в камеру *а* или *б* поршневого сервопривода *9*.

Под действием разности давлений жидкости в камерах *а* и *б* поршень перемещается и изменяет положение регулирующего органа *8*. Струйные усилители, позволяющие добиваться довольно высоких коэффициентов передачи, используют для мощной запорной арматуры.

Рассмотрим пневматический усилитель «сопло-заслонка» (рис. 96, *г*), который состоит из заслонки *10*, сопла *4* с подводящей трубкой *7*, мембранного исполнительного механизма *12*, соединительных линий *11*. Под

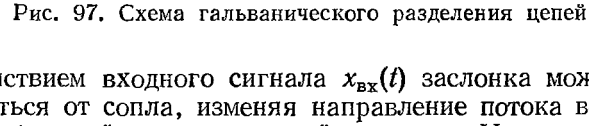


Рис. 97. Схема гальванического разделения цепей

воздействием входного сигнала $x_{вх}(t)$ заслонка может отклоняться от сопла, изменяя направление потока воздуха на мембранный исполнительный механизм. Изменение давления в верхней полости мембранного исполнительного механизма является выходной величиной усилителя, жесткая мембрана которого соединена с регулирующим органом *8*. В нейтральном положении регулирующий орган удерживается уравновешивающей пружиной *2*.

Для электронной регулирующей аппаратуры последних модификаций используют *гальваническое разделение цепей* во избежание опасности появления ложного заземления линий связи.

Схема, показанная на рис. 97, предназначена для разделения входных и выходных цепей регулирующей аппаратуры. Входной токовый сигнал поступает на модулятор *М*, где превращается в последовательные импульсы. Разделение входных и выходных цепей происходит через разделительный трансформатор *ТР*. Далее сигнал через демодулятор *ДМ* и фильтр *Ф*, которые выпрямляют и сглаживают сигнал, направляется к другому электрическому контуру. Благодаря такому устройству происходит локализация помех и предотвращение их распространения на другие контуры.

В зависимости от структуры АСР исполнительные механизмы (сервоприводы) могут быть одним из элементов регу-

применяют в качестве компенсирующих преобразователей, а в приборах косвенного измерения тепловых величин (тепломерах) в качестве решающих преобразователей, выполняющих простейшие операции деления и умножения.

Унифицированный ферродинамический преобразователь ПФ (рис. 32, *а*) состоит из магнитопровода *2*, в центральной части которого расположена обмотка возбуждения *5*, питаемая переменным током напряжением 60 или 12 В.

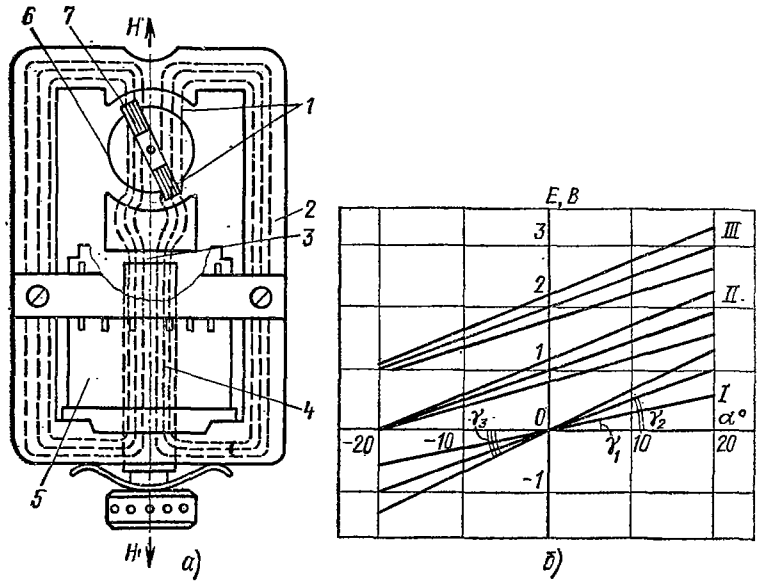


Рис. 32. Устройство (*а*) и градуировочная характеристика (*б*) взаимозаменяемого ферродинамического преобразователя ПФ: *1*, *3* — зазоры, *2* — магнитопровод, *4* — плунжер, *5* — обмотка возбуждения, *6* — сердечник, *7* — рамка

На обмотку возбуждения намотана соединенная с ней последовательно обмотка смещения. В центральной части магнитопровода имеется цилиндрическая выточка, где размещается магнитный цилиндрический сердечник *6*, вокруг которого может поворачиваться в зазоре *1* рамка *7*. При измерении поворот рамки осуществляется чувствительным элементом первичного преобразователя. Плунжер *4* служит для регулирования воздушного зазора *3*, при этом изменяется градуировочная характеристика преобразователя — угол γ (рис. 32, *б*). При подаче напряжения питания в обмотку возбуждения в магнитопроводе *2* возникает маг-

лятора или работать как самостоятельный механизм по управляющему сигналу регулятора. Различают три вида сервоприводов: с постоянной скоростью выходного вала, т. е. перемещение выходного вала или поршня не зависит от величины управляющего сигнала; с переменной скоростью выходного вала; с пропорциональной скоростью перемещения выходного вала.

Исполнительные механизмы должны иметь достаточный запас мощности для максимального перестановочного усилия, минимальный выбег (люфт) и возможность перемещения как в одну сторону (на открытие), так и в другую сторону (на закрытие) регулирующего органа.

§ 66. Принцип действия регулятора

Основным условием качественной работы автоматической системы регулирования АСР является быстрая компенсация всех поступающих возмущений, при этом конст-

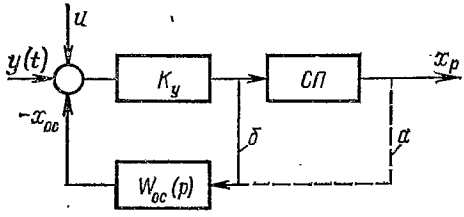


Рис. 98. Структурные схемы ПИ-регулятора с охватом сервопривода обратной связью (*а*) и без охвата (*б*)

рукция регуляторов зависит от конкретных узлов и элементов, которые используются для их реализации. Как уже отмечалось, регулятор должен усиливать сигнал по мощности, что осуществляется командно-усилительным устройством и сервоприводом. Выбранный закон регулирования формируется в регуляторах функциональными обратными связями. Рассмотрим схемы регуляторов, показанных на рис. 98.

В первом случае (линия *а*) сервопривод охвачен отрицательной обратной связью, а во втором случае (линия *б*) отрицательная обратная связь охватывает лишь каскад усиления K_y. Сравнивая обе схемы (показанные на одном рисунке), можно сделать вывод, что для первого варианта формирование закона регулирования определяется целиком

нитный поток, который индуцирует эдс в рамке 7. Эдс зависит от угла поворота рамки α и является выходным сигналом преобразователя.

Конструкция преобразователя позволяет рамке поворачиваться на угол $\pm$ 20° относительно нейтрали (ось *НН*), при этом эдс изменяется от —1 до +1 В. Статическая или градуировочная характеристика $E=f(\alpha)$ имеет линейный вид (рис. 32, *б*, линия *I*). В зависимости от напряжения смещения эта характеристика меняет свое положение на графике (смещение 1В — линия *II*, смещение 2В — линия *III*).

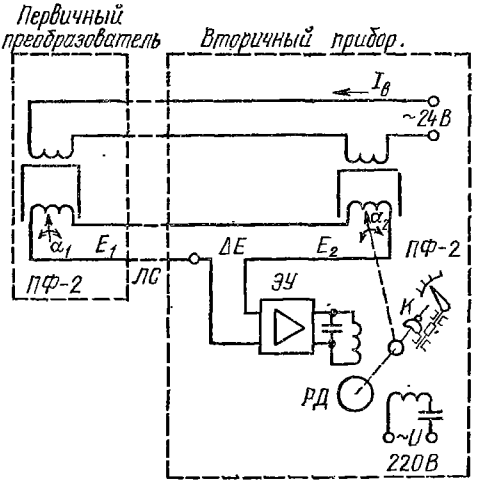


Рис. 33. Схема дистанционной передачи измерительных сигналов на основе ферродинамических преобразователей

Принципиальная схема дистанционной передачи измерительных сигналов с ферродинамическими преобразователями (без обмоток смещения) в качестве передающего в первичном и компенсирующего во вторичном приборе показана на рис. 33. Из схемы видно, что обмотки возбуждения соединены последовательно и получают питание от одного источника напряжения. При наличии измеряемого сигнала в ПФ возникает разность эдс $\Delta E=E_1-E_2$. Сигнал небаланса усиливается в *ЭУ* и подается на реверсивный двигатель *РД*, вал которого соединен с рамкой компенсирующего преобразователя, а через профилированный кулачок *К* (линейный или квадратичный) со стрелкой прибора. Пере-

обратной связью, а для второго варианта закон управления формируется не только замкнутой цепью $K_у—W_{ос}$, но и характеристикой сервопривода, который включен последовательно с замкнутым контуром. Следовательно, при различных конструкциях регуляторов передаточные функции $W_{ос}(p)$ должны быть разными для воспроизведения одного и того же закона регулирования. Для электрических систем регулирования преимущество имеет вариант без охвата

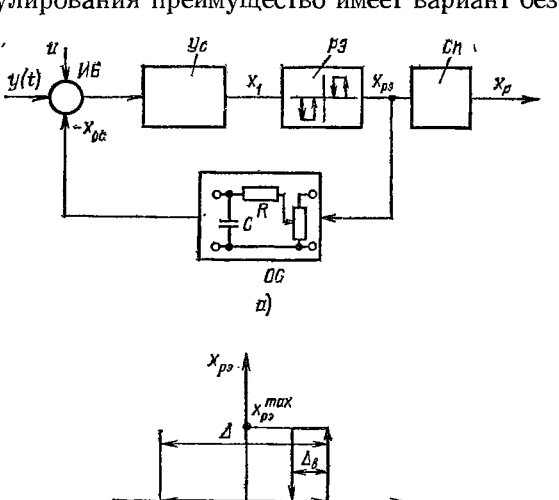


Рис. 99. Схема промышленного регулятора с трехпозиционным реле в прямом канале усиления, охваченном обратной связью (*а*) и статическая характеристика реле (*б*)

сервопривода обратной связью (линия *б*), так как эта схема позволяет разнести между собой регулирующий прибор и сервопривод.

При использовании в АСР в качестве сервопривода механизмов с постоянной скоростью функциональная схема регулятора строится так, как показано на рис. 99, *а*.

Наиболее близко к заданному закону регулирования можно приблизиться лишь при условии импульсного управления исполнительной частью АСР (сервоприводом). С этой целью в конструкцию регулятора вводится релейный элемент, статическая характеристика которого показана на

мещение *РД* этих частей вторичного прибора происходит до тех пор, пока разность эдс не будет равна нулю. Тогда показания прибора будут соответствовать значению измеряемой величины.

Как уже говорилось, в теплотехнических приборах в качестве передающих могут быть использованы преобразователи других типов. На рис. 34 показана схема дистанционной передачи измерительного сигнала с помощью дифференциально-трансформаторного преобразователя *ДТП* и компенсирующего ферродинамического преобразователя *ПФ*-2, расположенного во вторичном приборе. Принцип действия измерительной схемы *ДТП* такой же, как и предыдущей.

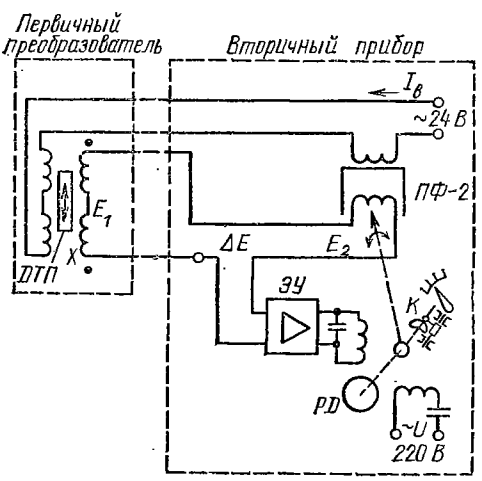


Рис. 34. Схема дистанционной передачи измерительных сигналов с передающим преобразователем ДТП и компенсирующим преобразователем ПФ

В рассмотренных схемах дистанционной передачи в качестве вторичных применяются показывающие и самопишущие ВФП и ВФС, а также регулирующие КС2, КС4 приборы. Вторичные приборы с преобразователями ПФ имеют длину линии дистанционной передачи сигналов 1 км. Недостатки ферродинамических преобразователей те же, что и дифференциально-трансформаторных.

К ферродинамическим преобразователям относят и частотные ПГ, унифицированным сигналом которых является частота в диапазоне 4—8 кГц. Преобразователи ПГ служат для преобразования угловых или линейных перемещений

рис. 99, *б*. Рассмотрим принцип действия регулятора (см. рис. 99, *а*). Обратная связь выполняется в виде *RC*-цепочки, т. е. инерционного звена первого порядка: $W_{oc}(p)=K_{oc}/(1+T_{и}p)$.

При поступлении на вход измерительного блока *ИБ* ступенчатый сигнал $y(t)$ преобразовывается усилителем *Ус* и, проходя далее по прямой цепи, поступает на релейный элемент *РЭ*. Через этот элемент сигнал может пройти дальше лишь при превышении зоны нечувствительности $x_1 \geqslant \Delta/2$. В это время срабатывает реле и сигнал $x_{рэ}$ проходит на сервопривод *Сп*, включая его, и на функциональную об-

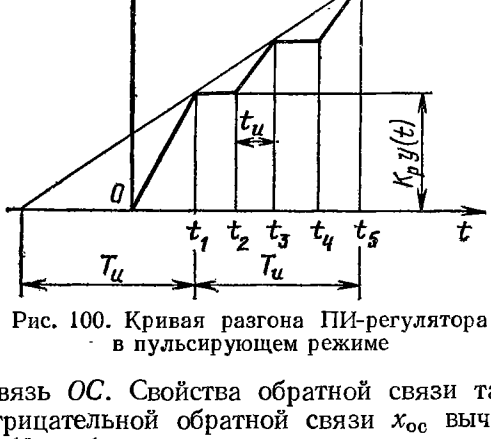


Рис. 100. Кривая разгона ПИ-регулятора в пульсирующем режиме

ратную связь *ОС*. Свойства обратной связи таковы, что сигнал отрицательной обратной связи x_{oc} вычитается из сигнала $y(t)$ в блоке сравнения, и наступает момент t_1, когда разность этих двух сигналов, усиленная элементом *Ус*, становится меньше зоны нечувствительности обратного хода $(\Delta/2)-\Delta_в$ релейного элемента, в результате чего отключается реле, разрывается цепь управления сервоприводом и он останавливается. Сигнал на входе устройства обратной связи также исчезает.

Однако, поскольку сигнал $y(t)$ остается постоянным, через некоторое время, т. е. в момент времени t_2, этот цикл повторится. Таким образом, получается еще одно импульсное срабатывание сервопривода и перемещение регулирующего органа. Цикл повторяется до тех пор, пока на входе измерительного блока остается постоянный сигнал $y(t)$ (до срабатывания концевых выключателей электрического двигателя). Такой режим работы называют *пульсирующим*. На рис. 100 графически изображен пульсирующий режим

первичных и вторичных приборов в частоту сигнала переменного тока, изменяемую пропорционально этому перемещению. Схема передачи сигналов ПГ, так же как ПФ, построена по автокомпенсационному принципу. Частотозадающим элементом схемы ПГ является RL-цепь, при изменении индуктивности которой в процессе измерений изменяется частота выходного сигнала.

§ 21. Электросиловые преобразователи

Электросиловые преобразователи предназначены для преобразования возникающего усилия чувствительного элемента в унифицированный сигнал постоянного тока.

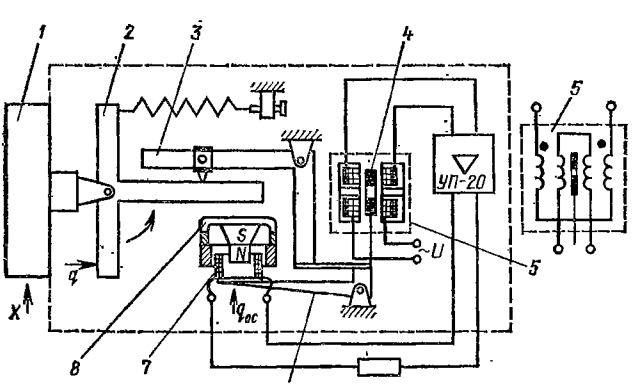


Рис. 35. Схема электросилового преобразователя:
1 — чувствительный элемент, *2, 3, 6* — рычаги, *4* — флажок, *5* — индикатор рассогласования, *7* — подвижная рамка, *8* — постоянный магнит

Их входным сигналом является сила, возникающая в чувствительном элементе первичного преобразователя при измерениях (например, при его деформации), а выходным — унифицированный сигнал постоянного тока 0—5 мА или 0—20 мА. Эти преобразователи выпускают с линейной (в первичных приборах для измерения давления, его разности, уровня) и квадратической (в первичных приборах для измерения расхода) характеристиками.

Действие таких преобразователей основано на принципе силовой компенсации — усилие в чувствительном элементе, возникающее под действием измеряемой величины, компенсируется усилием, действующим на этот же чувствительный элемент со стороны устройства обратной связи. Схема преобразователя показана на рис. 35. Измеряемая

регулятора. Соединив вершины ступенчатой линии, получаем идеализированную характеристику ПИ-закона регулирования. Наклон этой линии к оси времени t зависит от параметров обратной связи. Соблюдение пульсирующего режима является необходимым условием реализации линейных законов регулирования.

§ 67. Особенности регулирующей аппаратуры серии «Каскад»

Государственная система приборов и средств автоматизации (ГСП) «Каскад» в отличие от ранее выпускавшихся электронных приборов обладает рядом особенностей и преимуществ, обеспечивающих широкое применение их в промышленности.

Система предусматривает единую классификацию приборов и средств контроля и управления, блочно-модульный принцип построения всей серии, унификацию входных и выходных сигналов, единые требования к точности и надежности технических средств.

Блочно-модульное построение приборов на основе полупроводниковых (транзисторных) и ферритовых элементов уменьшает размеры аппаратуры и увеличивает надежность систем управления. Кроме того, серийные модули легко заменяются, не требуя индивидуальной настройки. Увеличиваются возможности введения дополнительных функций.

Связь с измерительными приборами и преобразователями осуществляется унифицированным токовым сигналом 0—5 и 0—20 мА, что повышает точность передачи информации, так как исключается влияние линии связи. Этот сигнал удобно контролировать, суммировать и преобразовывать, а также использовать многократно.

В системе «Каскад» используют операционные усилители постоянного тока УВ-21, УВ-22, УВ-41, которые имеют малый дрейф нуля и применяются в релейно-импульсных регулирующих блоках. Выходные цепи усилителей гальванически разделяются с входными цепями, что уменьшает и локализует помехи (см. рис. 97).

Регулирующие блоки «Каскад» в сочетании с исполнительными механизмами обеспечивают заданные законы регулирования как в пульсирующем, так и в аналоговом режимах. Модификацией серии «Каскад» является аппаратура серии «Каскад-2», в которой значительно расширены функциональные возможности приборов, обеспечивается автоматическое воздействие на параметры настройки регулято-

величина воспринимается чувствительным элементом *1*, который передает усилие через систему рычагов *2* и *3* управляющему флажку *4* индикатора рассогласования *5*. Индикатор рассогласования, выполненный по дифференциально-трансформаторной схеме, воспринимает это усилие и начинает перемещаться в пространстве между обмотками. При этом возникающая во вторичной обмотке эдс поступает на вход полупроводникового усилителя УП-20, где усиливается и преобразуется во входной унифицированный сигнал постоянного тока. Этот сигнал поступает в линию дистанционной передачи и одновременно в цепь обратной связи, состоящую из обмотки подвижной рамки *7*, которая размещается в магнитном поле постоянного магнита *8*. При взаимодействии магнитных потоков возникает усилие, передающееся на рычаг обратной связи *6*. Мерой входного усилия, а следовательно, и измеряемой величины является значение выходного сигнала тока.

Распространенные типы первичных приборов с электросиловыми преобразователями ЭКП имеют класс точности 0,6; 1; 1,5. В качестве вторичных приборов могут быть использованы миллиамперметры КПУ, КВУ и КСУ. Достоинство электросиловых преобразователей — независимость их статических характеристик от нелинейности чувствительных элементов из-за незначительных перемещений при измерениях, недостаток — невысокая надежность при эксплуатации.

§ 22. Реостатные измерительные преобразователи и схемы дистанционной передачи

Реостатные измерительные преобразователи служат для преобразования линейных или угловых перемещений выходных механических устройств в унифицированный электрический сигнал, который передается по линии дистанционной передачи к потребителю. Их используют в качестве передающих, а в мостовых измерительных схемах дистанционной передачи сигналов — в качестве следящих. Переменным параметром реостатных преобразователей, на который оказывает влияние измеряемая величина, является электрическое сопротивление, распределенное линейно или по другому закону при перемещении движка реостата.

Устройство реостатного преобразователя, устанавливаемого во вторичных приборах КСП, КСМ, КСУ, показано на рис. 36, *а*. Реостатный преобразователь выполняют из

ров, совмещены в одном блоке измерительные и регулирующие модули, логические и вычислительные функции, расширен набор входных сигналов, возможно использование сигналов непосредственно от дифференциально-трансформаторных датчиков, термопар и термосопротивлений.

Блоки серии «Каскад-2», обладающие повышенной надежностью, точностью и помехозащищенностью, разделяют на группы: статического и динамического преобразований информации, оперативного управления, исполнительные и вспомогательные.

§ 68. Измерительный блок И-04

Измерительный блок И-04 относится к блокам статического преобразования информации серии «Каскад» и состоит из шести модулей, узлов масштабирования и компен-

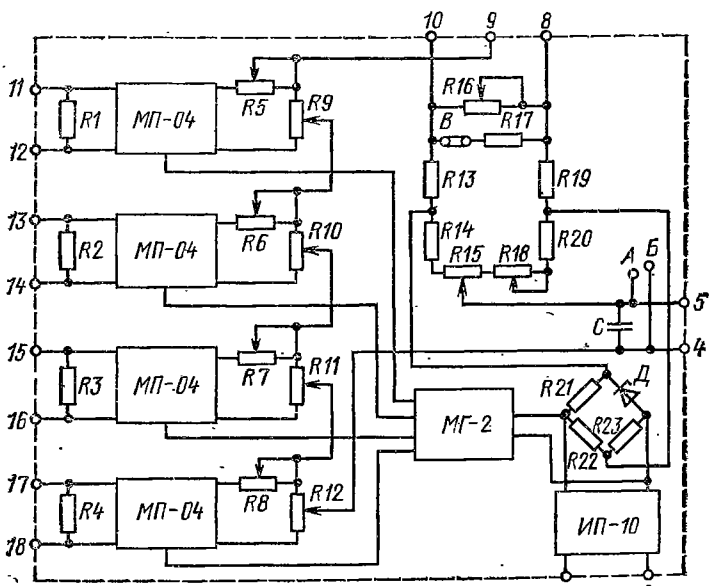


Рис. 101. Электрическая схема измерительного блока И-04

сации. Выходной сигнал блока не унифицирован, изменяется в пределах ±2,5 В.

Рассмотрим электрическую схему блока И-04, показанную на рис. 101. На выводы *11—18* подаются входные сигналы постоянного тока 0—5 мА. Сигналом для модульных преобразователей МП-04 является падение напряжения на

тонкой манганиновой (константановой) проволоки, намотанной на каркас из пластмассы. Обычно изготовляют две спирали (рабочую *3* и закороченную токоотводящую *1*), которые укладывают в канавки полиамидных колодок *4*. Необходимое натяжение спиралей обеспечивается с помощью пружины и гаек *2*. Движок преобразователя выполняют из специального износостойкого сплава. Надежность контакта движка со спиралью обеспечивается чистотой контактных поверхностей, достаточным контактным давлением и стойкостью материала против истирания. Движок преобразователя сочленен с движком измерительного реохорда

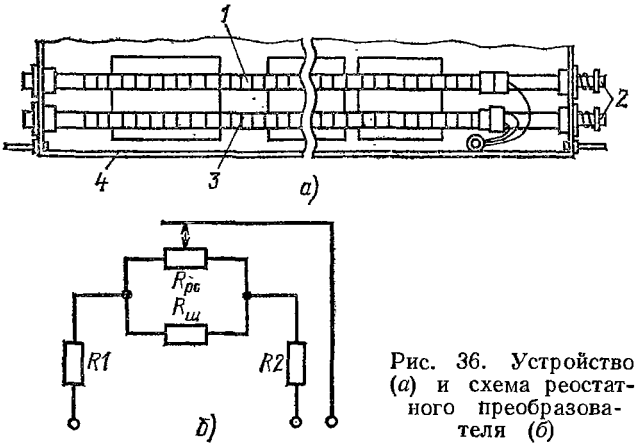


Рис. 36. Устройство (*а*) и схема реостатного преобразователя (*б*)

прибора. Таким образом, каждому значению измеряемой величины соответствует определенное положение движка реостатного преобразователя.

Схема реостатного преобразователя показана на рис. 36, *б*. Для приведения сопротивления преобразователя к заданному значению параллельно рабочей спирали $R_{рс}$ подключают шунтирующий резистор $R_ш$. В соседние плечи полумоста преобразователя включают резисторы *R1* и *R2* из манганина.

Реостатные преобразователи также могут устанавливаться в приборах КП, КС, измеряющих температуру и напряжение постоянного тока.

На рис. 37 показана мостовая схема дистанционной передачи сигналов с использованием двух реостатных преобразователей. Один из преобразователей, установленный во вторичном приборе, является передающим, а другой, установленный в дублирующем приборе, выполняет функции

резисторах *R1—R4*. На модульные преобразователи поступает также напряжение от модульного генератора МГ-2. Стабилитрон *Д*, включенный в качестве плеча в мостовую схему, состоящую из резисторов *R21*, *R22* и *R23*, служит источником питания модуля генератора. Далее сигнал, преобразованный и усиленный в модульных преобразователях МП-2, поступает на узлы масштабирования, включающие регулируемые резисторы *R9—R12*, которые позволяют регулировать долю каждого сигнала, поступающего на вход блока И-04. Резисторы *R5—R8* выполняют роль подстроечных органов. Узел компенсации состоит из резисторов *R13*, *R14*, *R19*, *R20*, потенциометров *R15*, *R18* и задатчика *R16*, собранных по мостовой схеме. Сигналы с резисторов *R9—R12* поступают в узел компенсации, где суммируются с его напряжением и друг с другом. Задатчик *R16* подключают к зажимам *8—10* блока И-04. Диапазон действия этого задатчика можно изменять с помощью ключа *В* и резистора (задатчика) *R17*. Задатчик *R16* служит для плавного изменения задания, а потенциометры *R15* и *R18* — для балансировки мостовой схемы компенсации.

Блок И-04 получает питание от блока ИП-10, который питается переменным напряжением от сети через зажимы *1* и *2*. Источник питания ИП-10 преобразовывает переменное напряжение в постоянное 30 В. При отклонении любого из сигналов, поданных на вход блока, от задания изменяется суммарный сигнал на узле масштабирования, в результате чего равновесие моста компенсации нарушается и с резистора *R15* снимается сигнал небаланса, являющийся выходным сигналом блока И-04. Зажимы *4* и *5* служат для снятия выходного сигнала, а конденсатор *С* — для сглаживания его пульсаций.

Далее сигнал, преобразованный и усиленный блоком И-04, поступает на другие блоки системы. На блоке имеются органы настройки и контроля. Для совмещения статических характеристик датчиков предназначены резисторы *R5—R8*. Переключатель диапазона задатчика *R17* позволяет изменять его от 0 до 100% регулируемой величины, а с помощью резистора *R16* плавно регулировать от 0 до 5%. Для контроля напряжения на выходе блока используют гнезда *А* и *Б*.

§ 69. Регулирующий блок Р-21

Регулирующий релейный блок Р-21 (рис. 102) служит для формирования сигнала управления электрическими исполнительными механизмами постоянной скорости и обес-

следящего. Постоянные резисторы *R1* — *R4* образуют схему автоматического уравновешенного моста. При нарушении равновесия моста из-за перемещения движка *Д* реостатного преобразователя вторичного прибора ВП на вход усилителя *ЭУ* подается напряжение небаланса, которое усиливается по мощности и приводит в действие реверсивный двигатель *РД* дублирующего прибора ДП. Выходной вал *РД*, связанный с движком реостата следящего преобразователя ДП и кареткой указателя шкалы, вращается до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие моста. При

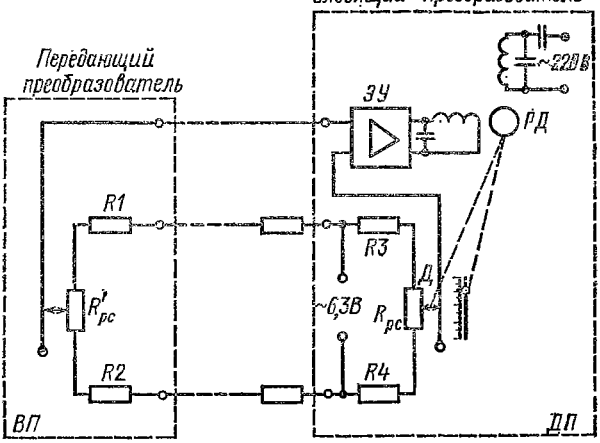


Рис. 37. Схема дистанционной передачи измерительных сигналов с использованием реостатных преобразователей

этом стрелка на ДП займет положение, соответствующее измеряемой величине, т. е. показаниям вторичного прибора.

Основное достоинство таких преобразователей — высокая точность и независимость показаний от изменений напряжения питания. Напряжение питания может быть постоянным или переменным.

§ 23. Пневматические преобразователи и дистанционная передача измерительных сигналов

Пневматические преобразователи предназначены для преобразования усилия или перемещения чувствительного элемента первичного прибора в унифицированный выходной сигнал давления воздуха ($p_{вых}$=0,02 ÷ 0,1 МПа). Их уста-

печивает ПИ-закон регулирования. На вход блока подаются унифицированные сигналы постоянного тока, при этом два токовых и один по напряжению через демпфирующее устройство *ДУ*, один токовый (0—5 мА) и один по напряжению (0—±24 В) непосредственно от датчиков поступают на усилитель УВ-41.

Демпфирующее устройство выполнено в виде *RC*-цепочки и предназначено для сглаживания пульсаций входного сигнала. Сигнал с выхода линейного высокочастотного усилителя УВ-41 направляется через фильтр (на схеме не по-

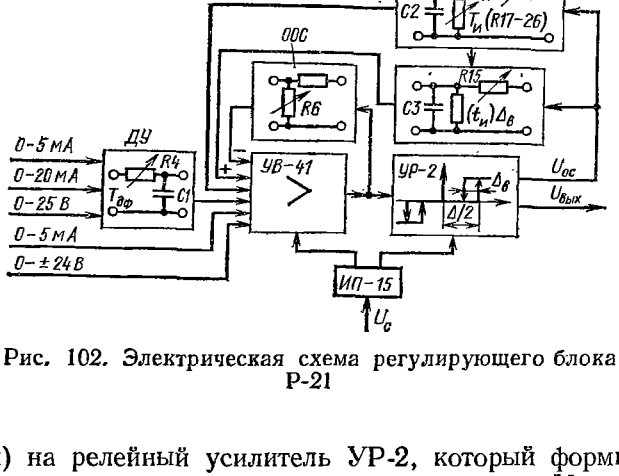


Рис. 102. Электрическая схема регулирующего блока Р-21

казан) на релейный усилитель УР-2, который формирует сигнал в виде напряжения постоянного тока. Усилитель имеет релейную характеристику, создаваемую двумя тиристорами, включенными на его выходе. Нагрузкой на выходе усилителя служит пусковое устройство, чаще всего тиристорный усилитель. Цепь главной обратной связи блока Р-21 охватывает оба усилителя (УВ-41 и УР-2) и выполняется в виде инерционного звена первого порядка (*RC*-цепочка). Настроечные органы цепей обратных связей играют роль статических и динамических настроек блока (например, ручки переключения $T_и$ для изменения постоянной времени интегрирования и $K_р(V_{св})$ для изменения коэффициента усиления регулятора и скорости обратной связи). На боковую панель управления блока Р-21 выносят также ручки регулирования зоны нечувствительности $\Delta_н$ и времени однократного включения регулятора $t_и$.

навливают в качестве дополнительного устройства в манометрических термометрах, приборах для измерения давления, в дифманометрах и в некоторых вторичных приборах (ВФС, ВФП, КСП-3, КСМ-3, КСД-3).

Принцип действия пневматических преобразователей (рис. 38) основан на силовой компенсации. Пневматический преобразователь выполняется в виде отдельного блока и может устанавливаться в измерительном приборе. Измеряемый или выходной параметр (например, угол поворота

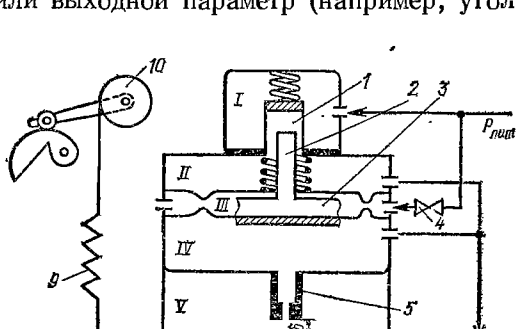


Рис. 38. Схема пневматического преобразователя с силовой компенсацией:
1 — клапан, *2* — шток, *3* — блок, *4* — дроссель, *5* — сопло, *6* — заслонка, *7* — рычаг, *8* — мембрана, *9* — пружина, *10* — ролик

выходного вала прибора) с помощью ролика *10*, пружины *9* и рычага *7* преобразуется в усилие q, которое действует на заслонку *6*, выполненную в виде мембраны *8*. Сжатый воздух из линии питания под давлением $p_{пит}=0{,}014$ МПа (допустимое отклонение $\pm 10\%$) поступает в камеру *I* и через дроссель *4* в камеру *IV*. Камера *III* сообщается с атмосферой. Из камеры *I* воздух поступает через пластинчатый клапан *1*, связанный с мембранным блоком *3*, в камеру *II*, которая через полый шток *2* блока *3* соединена с камерой *III* и, следовательно, сообщается с атмосферой. Выходное давление $p_{вых}$ создается в камере *II* и одновременно передается в камеру обратной связи *V*. При возрастании усилия q пропорционально измеряемой величине сопло *5* прикрывается, вследствие чего давление в камере *IV* будет повышаться, при этом возрастет сила, действующая на мембрану бло-

Кроме главной обратной связи усилитель УВ-41 охвачен локальной отрицательной обратной связью *ООС* для повышения стабильности его характеристик.

Блок Р-21 представляет собой сварной корпус с металлическим выдвигающимся шасси. Принцип его действия следующий. Сигнал от датчиков, пройдя через фильтр и усилитель УВ-41, поступает в виде напряжения постоянного тока на вход усилителя УР-2. В зависимости от фазы сигнала на выходе блока возникает сигнал управления, который поступает на главную обратную связь. Свойства главной обратной связи определяются ее конструкцией (*RC*-цепочкой) и позволяют реализовывать ПИ-закон регулирования. Питание блока осуществляется напряжением переменного тока 220 В от источника ИП-15.

§ 70. Регулирующий аналоговый блок Р-12

По назначению блок Р-12 (рис. 103) может использоваться в качестве самостоятельного регулятора для управления исполнительными устройствами или корректирую-

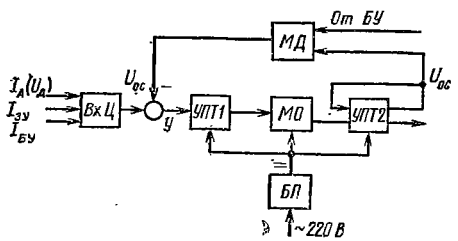


Рис. 103. Схема регулирующего аналогового блока Р-12

щего устройства в многоконтурных схемах управления. Он формирует выходной сигнал постоянного тока 0—5 мА и обеспечивает различные заданные законы регулирования (П, ПИ и ПИД).

Блок имеет три токовых (два от 0 до 5 мА, один от 0 до 20 мА) и один по напряжению (от 0 до 2,5 В) входы. Сигнал на вход блока поступает без масштабирования непосредственно от датчиков или через измерительный блок И-04. Блок Р-12 состоит из основных узлов: входных цепей *ВхЦ*, усилителей постоянного тока *УПТ1* и *УПТ2*, блока ограничения (модуля) *МО*, при этом *УПТ2* позволяет получать на выходе один токовый сигнал и дополнительный сигнал по напряжению. Сигналы выхода имеют гальваниче-

ка *3*, и шток *2* переместится вверх. Шток воздействует на клапан *1*, который, открываясь, пропускает больше воздуха из камеры *I* в камеру *II* и далее в линию дистанционной передачи пневматических сигналов. Выходное давление $p_{вых}$ повышается и одновременно подается в камеру *V*, где оказывает обратное усилие $q_{ос}$ на мембрану *8* до тех пор, пока не установится равновесие. При этом появляется другой зазор δ между соплом и заслонкой, соответствующий другому давлению $p_{вых}$.

По такому же принципу работает и пневматический передающий преобразователь, преобразующий входной сигнал в виде перемещения в выходной унифицированный сигнал давления воздуха ($p_{вых}=0{,}02 \div 0{,}1$ МПа). Такое преобразование выполняют приборы ДП и ДСП. Индикатор рассогласования в этих приборах, осуществляющий измерение сигнала, изготовляют в виде сопла-заслонки, а в качестве устройства обратной связи применяют сильфон. Для установки начального давления ($p_{вых}=0{,}02$ МПа) преобразователи снабжают корректором нуля, изменяющим натяжение измерительной пружины. Из-за высокого коэффициента усиления наибольшее перемещение заслонки не превышает 0,01 мм, что определяет высокую чувствительность этих преобразователей. Основная погрешность их не превышает $\pm 1\%$.

Первичные приборы преобразователей с выходным сигналом 0,02—0,1 МПа работают с любыми пневматическими показывающими и самопишущими вторичными приборами. Кроме того, они могут работать совместно с функциональными и регулирующими устройствами пневмоавтоматики. Расстояние передачи измеряемых сигналов не должно превышать 300 м.

В комбинированных электропневматических системах автоматического контроля, регулирования и управления для согласования вида энергии сигналов применяют электропневматические ЭПО (преобразование электрического в пневматический сигнал) и пневмоэлектрические ППЭ (преобразование пневматического в электрический сигнал) преобразователи. В электрической части преобразователей используют обычно дифференциально-трансформаторные преобразователи. Принцип действия пневмоэлектрических преобразователей основан на компенсации усилия, создаваемого входным сигналом (электрическим или пневматическим) и усилием устройства отрицательной обратной связи, создаваемым соответствующим выходным сигналом (пневматическим или электрическим).

ское разделение цепей. Все элементы блока охвачены отрицательной обратной связью, образующей модуль динамики (блок обратной связи) *МД*. Блок Р-21 получает питание от блока *БП*, на который поступает дополнительный сигнал от блока управления *БУ*.

Сигналы от датчиков или блока И-04 поступают на узел входных цепей, куда подается также сигнал задающего устройства $I_{зу}$. Далее сигнал рассогласования y идет на усилитель постоянного тока *УПТ1*, проходя через сумматор, где формируются сигналы рассогласования от входных цепей и обратной связи. Блок ограничения *МО* сигнала обеспечивает дальнейшее его преобразование, ограничивая сигнал по минимуму и максимуму. Усилитель *УПТ2* является окончательным блоком усиления. Блок обратной связи *МД* получает сигнал с выхода усилителя *УПТ2* и обеспечивает плавное (безударное) переключение цепей с ручного управления на автоматическое. Блок обратной связи *МД* обеспечивает формирование сигнала управления в соответствии с П-, ПИ- или ПИД-законами регулирования.

§ 71. Особенности регулирующей аппаратуры АКЭСР

Наряду с аппаратурой «Каскад» для регулирования процессов на тепловых электрических станциях используют агрегатный комплекс электрических средств регулирования (АКЭСР), который имеет ряд особенностей.

Широкое использование интегральных микросхем общего и специального назначения для этой аппаратуры обеспечивает не только высокую надежность устройств, но и уменьшает габариты отдельных модулей. Блоки АКЭСР обладают повышенной функциональной насыщенностью, т. е. каждый блок может выполнять несколько операций, благодаря чему сокращается общее число блоков.

Блоки серии АКЭСР реализуют функции, которые отсутствуют в других типах аппаратуры. С их помощью можно дистанционно изменять параметры динамической настройки регуляторов, интегрировать импульсный и аналоговые сигналы с сохранением значения выходного сигнала при перерывах в питании, обеспечивать связь с управляющей вычислительной техникой. Кроме того, блоки позволяют выделять экстремальные (минимальные или максимальные) сигналы и проводить их нелинейные преобразования. Блоки АКЭСР используют широкий круг унифицированных сигналов, как напряжения постоянного тока (от 0 до ± 10 В), так и сигналы постоянного тока (от 0 до 5, от 0 до 20 и от 4 до 20 мА). Для обеспечения помехозащищенно-

§ 24. Технические характеристики вторичных приборов

Современные вторичные приборы, применяемые на ТЭС, являются показывающими, самопишущими и регулирующими, работающими на принципе автоматического измерения физической величины компенсационным методом. Измерительная схема вторичного прибора (автоматического потенциометра) показана на рис. 39. Измеряемый сигнал неэлектрических величин (температуры, давления, расхода) поступает в преобразователь *П*, где преобразуется

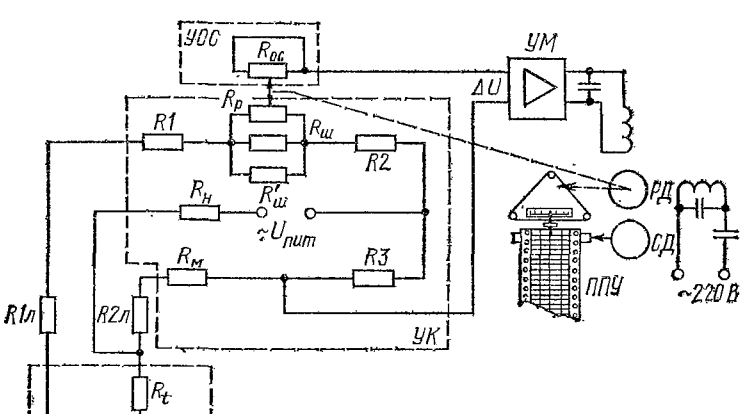


Рис. 39. Измерительная схема вторичного прибора (автоматического потенциометра):
$R_н$, $R_ш$ — резисторы нагрузки и шунта

в электрический сигнал (напряжение или ток), а затем на устройство компенсации *УК*, куда также приходит с противоположным знаком сигнал от устройства обратной связи *УОС*. Разность этих двух сигналов усиливается по мощности в усилителе *УМ* и подается на сервопривод, состоящий из асинхронного электродвигателя и редуктора *РД*. Электродвигатель обеспечивает перемещение показывающего и пишущего устройства *ППУ* и чувствительного элемента регулирующего устройства прибора. Одновременно с асинхронного двигателя сигнал передается на *УОС*. Во вторичном приборе имеется также синхронный двигатель *СД*, обеспечивающий равномерное перемещение диаграм-

сти аппаратуры все аналоговые сигналы вводятся через блоки гальванического разделения.

В аппаратуре АКЭСР применяют независимые источники опорного напряжения, которые можно использовать вместе с делителями напряжения в качестве встроенных задатчиков. Аппаратуру изготовляют в двух вариантах:

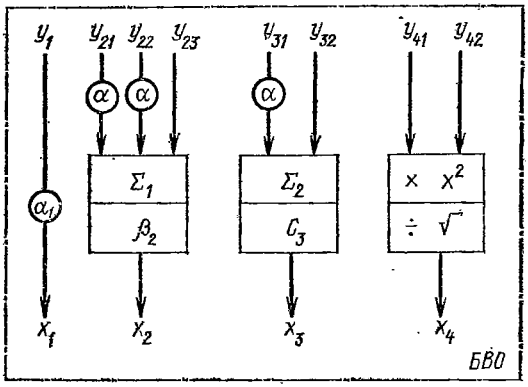


Рис. 104. Блок вычислительных операций БВО

приборную (с индексом «П») и шкафную (с индексом «Ш»). Приборные модули получают питание от индивидуальных источников питания, а шкафные модули — от групповых блоков питания. Шкафное исполнение приборов АКЭСР позволяет монтировать в заводских условиях целые субблоки или узлы, что значительно снижает трудозатраты и уменьшает размеры приборных панелей. Из-за многофункциональности блоки АКЭСР трудно изобразить на схемах с помощью одного символа, поэтому их рекомендуется изображать в виде набора нескольких узлов, дающих представление о наиболее характерных функциях модуля.

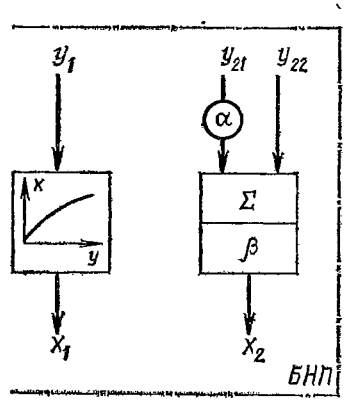


Рис. 105. Блок нелинейных преобразований БНП

На рис. 104 показан блок вычислительных операций (БВО), который позволяет выполнять перемножение двух сигналов, возведение в квадрат, деление, извлечение кор-

мы прибора. При большом коэффициенте усиления измеряемого сигнала в прямом канале прибора его выходной сигнал будет пропорционален сигналу *УОС*.

Одним из основных элементов автоматических приборов является измерительная схема, построенная по компенсационному методу измерения. Измерительные схемы потенциометров и схемы уравновешенных мостов при измерениях температуры были рассмотрены в гл. II. При определении других физических величин применяют аналогичные измерительные схемы, принцип действия которых будет рассматриваться ниже.

Другим элементом автоматических приборов является усилитель мощности *УМ*, который усиливает входные сигналы постоянного и переменного тока. Такими элементами могут быть электронные ламповые УЭ, УЭМ, УЭУ и полупроводниковые УП. Усилители должны быть рассчитаны на питание от сети переменного тока частотой 50 Гц и напряжение 220 В, безотказно работать при температуре окружающего воздуха от 0 до 65°С и относительной влажности от 30 до 80%, иметь надежную защиту (экраны) от влияния внешних электростатических и электромагнитных полей, создающих помехи при работе. Порог чувствительности усилителей составляет 1,10 или 100 мкВ, при этом уровень их внутренних шумов на входе не должен превышать 1, 10 или 100 мкВ.

Выходная мощность усилителей допускается от 1,5 до 10 Вт, уровень их шумов на выходе не более 10% от наибольшего значения сигнала.

Ламповые усилители работают с реверсивными асинхронными двигателями РД-09 и РД-09Т, а полупроводниковые — с двигателями РД-09П2. Указанные двигатели относят к классу асинхронных двухфазных двигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором, которые благодаря надежности и простоте схемы управления широко применяют в автоматических приборах.

Асинхронные двигатели должны иметь минимальные напряжение начала движения и инерционность, номинальную механическую мощность от 0,5 до 10 Вт, кпд не ниже 20%.

Кроме асинхронных в автоматических приборах используют синхронные электродвигатели, предназначенные для перемещения диаграммы, приведения в действие печатающего механизма и переключателей (в многоточечных приборах). Отличительный признак синхронных электродвигателей — постоянная частота вращения. В автоматических

ня. На одном сумматоре блока суммируются три сигнала (два из них масштабируемые), на другом — два (масштабируемый и немасштабируемый). Коэффициент β_2 модуля БВО можно устанавливать на одно из значений — 0,5; 1,0; 5,0, а его коэффициент $C_в$ изменяется от 1 до 10.

На рис. 105 показан блок нелинейных преобразований (БНП), который выполняет преобразования входного сигнала y согласно заданной нелинейной зависимости $x=F(y)$, а также суммирует два входных сигнала y_{21} и y_{22}. Сигнал y_{21} является масштабируемым.

§ 72. Регулирующие блоки АКЭСР

В системе АКЭСР, так же как и в системе «Каскад», применяют импульсные *РБИ* и аналоговые *РБА* регулирующие блоки. Электрическая схема блока *РБИ* (рис. 106)

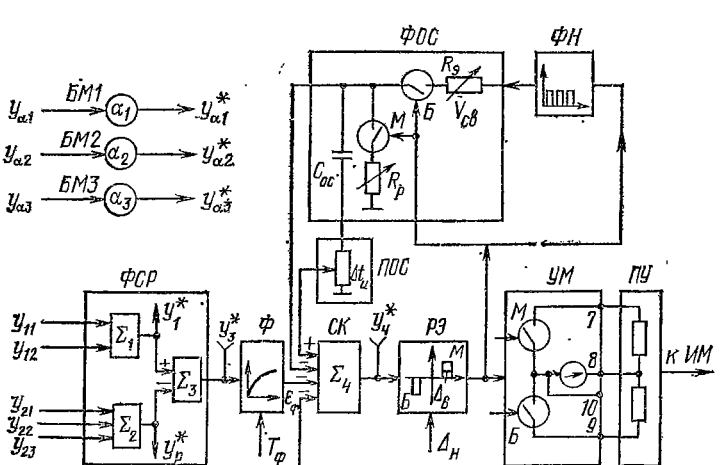


Рис. 106. Схема блока РБИ:

М, *Б* — сигналы («меньше», «больше») с выхода релейного элемента, $V_{св}$ — скорость связи, $\varepsilon_ф$ — сигнал с выхода фильтра, α_1—α_3 — коэффициенты узлов масштабирования, $y\alpha_1$—$y\alpha_3$ и $y\alpha_1^*$—$y\alpha_3^*$ — входные и выходные величины. Цифрами (*7—10*) обозначены зажимы

соответствует схеме ПИ-регулятора и состоит из суммирующего каскада *СК*, релейного элемента *РЭ* и функциональных обратных связей *ФОС*. Кроме того, в схему также входят: блоки масштабирования *БМ1—БМ3*, узел формирования сигнала рассогласования *ФСР*, демпфер *Ф*, усилитель

приборах КСП, КСМ, КСУ применяют электродвигатели СД-54, ДСМ. Электродвигатели ДСМ обеспечивают скорость перемещения диаграммы до 2400 мм/ч.

В автоматические приборы может входить регулирующее устройство, которое поддерживает стабильными измеряемые величины (температуру, давление и др.), характеризующие технологический процесс, или изменяет их по заданной программе. Это устройство встраивают в автоматические приборы, в обозначение которых добавляют букву Р (например, ДС — автоматический прибор без регулирования, ДСР — прибор с регулированием), или выполняют в виде приставки.

В зависимости от закона регулирования устройства подразделяют на позиционные и непрерывные регуляторы. Позиционные регуляторы, встраиваемые в прибор, представляют собой трехпозиционные реле с двумя контактами, которое обеспечивает три значения регулируемой величины: мало, норма, много.

Позиционные регуляторы служат для замыкания цепей звуковой и световой сигнализации о достижении измеряемых параметров предельных значений.

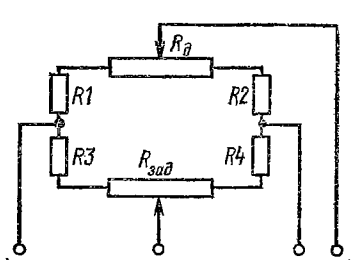


Рис. 40. Схема реостатного задатчика в регулирующем приборе

Непрерывные регуляторы выполняют в виде приставок. Принцип их действия связан с установкой задатчика, обеспечивающего значение измеряемой величины, которое должно поддерживаться постоянным или изменяться по программе. Задатчик обычно встраивают в прибор; его вид зависит от измеряемой величины. В частности, в приборы КС1, КП1, КВ1, КС2, КС4 встраивают реостатные задатчики. В схему реостатного задатчика (рис. 40) входят реохорд-датчик $R_д$, движок которого перемещается реверсивным двигателем прибора для компенсации сигнала измерения, реохорд-задатчик $R_{зад}$, движок которого устанавливается вручную оператором энергоблока, и резисторы *R1 — R4* измерительного моста регулятора.

Важной функцией регулирующих приборов является запись измеряемых величин. Записанные изменения параметров во времени представляют собой документ, характеризующий весь технологический процесс производства

мощности *УМ* и формирователь напряжения *ФН* для обратной связи.

Сумматоры Σ_1 и Σ_2 узла *ФСР* формируют сигнал рассогласования, при этом входные сигналы y_{21}, y_{22} и y_{23} — масштабируемые, а входы y_{11} и y_{12} — немасштабируемые. Блоки масштабирования, позволяющие плавно менять коэффициенты передачи, выполнены в виде переменных резисторов. Функционально сумматор Σ_1 служит для ввода сигнала регулируемой величины, а Σ_2 — для ввода сигнала задания. После узла *ФСР* сигнал попадает на фильтр *Ф*, который выполнен в виде *RC*-цепочки и служит для сглаживания пульсаций сигнала рассогласования. Для настройки фильтра используют регулировку постоянной времени $T_ф$. Следующим узлом является высокоомный суммирующий каскад *СК*, где суммируются сигналы с фильтра *Ф*, функциональной обратной связи *ФОС* и дополнительный сигнал y_{31}. Для сумматора Σ_4 используется стандартный гибридный операционный усилитель *ОУ4*.

С выхода сумматора Σ_4 сигнал подается на релейный элемент *РЭ*, имеющий характеристику трехпозиционного реле с зоной нечувствительности $\Delta_н$ и зоной возврата $\Delta_в$. Высокий коэффициент усиления и необходимые характеристики релейного элемента обеспечиваются операционными усилителями, собранными на интегральных микросхемах.

Сигнал с выхода релейного элемента по каналу «больше» или «меньше», каждый из которых реализуется операционным усилителем, поступает на усилитель мощности *УМ*, предназначенный для обеспечения достаточной нагрузочной способности выходных цепей регулирующего блока. Входные и выходные цепи *УМ* гальванически развязаны. С выхода усилителя мощности сигнал подается на пусковое устройство *ПУ*, обеспечивающее работу исполнительных механизмов *ИМ*. Функциональная обратная связь *ФОС* формирует закон регулирования и представляет собой апериодическое звено с разделенными цепями заряда и разряда. Разделение цепей заряда и разряда позволяет устанавливать независимо параметры настройки $К_р$ и $Т_и$ (на рисунке не указаны), для чего служат переменные резисторы $R_з$ и $R_р$.

Принцип действия блока *РБИ* аналогичен принципу действия релейно-импульсного регулятора. Сигнал рассогласования после релейного элемента раздваивается и поступает на усилитель мощности, который через пусковое уст ойство включает исполнительный механизм. Блок

электроэнергии на ТЭС, различные непредсказуемые ситуации, возникающие на ее объектах.

Измеряемые величины записывают на диаграммных (ЛП100, ЛП120, ЛП160, Л200, Л250, ЛП280, ЛП320, ЛП360 для приборов с прямолинейным перемещением пера) и дисковых (ДН200, ДН250, ДН300, ДВ200, ДВ250, ДВ300 для приборов с движением пера по окружности) лентах. На ленточную диаграмму по ширине наносят шкалу прибора, а по длине — расстояние в миллиметрах, т. е. диаграммную сетку. Наибольшее распространение получили диаграммы на бумажных лентах с перфорацией шириной 120, 180, 270 мм (соответственно ширина записи 100, 160, 250 мм). Диапазон скоростей движения ленточных диаграмм составляет от 5 до 720 000 мм/ч, а угловых скоростей перемещения дисковых диаграмм — один оборот от 4 мин до 7 сут. Диаграммную ленточную бумагу изготовляют в рулонах или пачках (складывающаяся).

Для непрерывной записи одной величины чаще всего используют капиллярную подачу чернил или пасты из неподвижного баллона к перу, укрепленному на каретке прибора. Кроме того, можно выполнять одноточечную или многоточечную запись соответственно одной или нескольких измеряемых величин с помощью печатающего механизма, что необходимо для сравнения измеряемых величин, расчета технико-экономических показателей (ТЭП), диагностики оборудования. Механизмы многоточечной записи состоят из редуктора, печатающего механизма, его привода и механизма управления переключением датчиков измеряемых величин.

Редуктор передает движение от синхронного двигателя через привод к печатающему механизму. Печатающий механизм наносит на диаграмму точки или крестики, характеризующие значение измеряемой величины, а рядом ставит цифры, показывающие номер датчика, который подсоединен к прибору переключателем в данный момент. Существуют 2-, 3-, 4-, 6-, 8-, 12- и 24-точечные переключатели, устанавливаемые в приборах. Может изменяться и длительность цикла опроса показаний датчиков (4, 12, 24 с).

Основные технические характеристики и виды вторичных приборов, применяемых на ТЭС, приведены в табл. 7.

Контрольные вопросы

1. Что называют первичным, передающим и промежуточным преобразователями?
2. Что представляет собой вторичный прибор?

функциональной обратной связи в зависимости от полярности сигнала будет работать на заряд или разряд. Если релейный элемент срабатывает по каналу «больше» или «меньше», замыкается ключ заряда, выполненный на резисторном оптроне. Под действием напряжения $U_в$ происходит заряд конденсатора обратной связи $C_{ос}$. При невозбужденном состоянии релейного элемента *РЭ* замыкается ключ разряда, выполненный на другом оптроне. Ключ заряда размыкается, и конденсатор $C_{ос}$ разряжается через переменный резистор $R_р$. Длительность импульсов включений $\Delta t_и$ исполнительного механизма может изменяться с помощью переменного резистора, сигнал с которого подается на положительную обратную связь *ПОС*, регулирующую порог отключения релейного элемента. На схемах регулирующие импульсные блоки *РБИ* изображаются как многофункциональные.

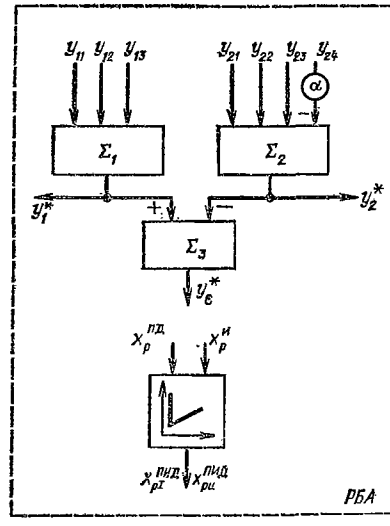


Рис. 107. Аналоговый регулирующий блок РБА

Регулирующий аналоговый блок *РБА* (рис. 107) предназначен для формирования входного сигнала рассогласования и его динамического преобразования в выходной аналоговый сигнал в соответствии с П-, ПД-, ПИ- или ПИД-законами регулирования. Он ограничивает сигнал по верхнему и нижнему уровню, имеет гальваническое разделение входных и выходных цепей и обеспечивает плавное переключение с ручного режима на автоматический и наоборот. Блок имеет пять входов аналоговых сигналов по напряжению и два аналоговых сигнала по току, выход по напряжению и току.

Регулирующие блоки АКЭСР выпускаются нескольких модификаций: без дистанционной настройки параметров, с дискретной дистанционной и аналоговой настройками параметров.

Опыт эксплуатации приборов серии АКЭСР выявил некоторые недостатки их конструкций, поэтому разработа-

Таблица 7. **Вторичные аналоговые приборы**

Наименование	Тип	Класс точности	Измеряемый параметр	Диапазон измерений	Первичный преобразователь	Вид выходного сигнала
Милливольтметры	М-64	1	Температура	От —50 до +200 и от 0 до 100°С; 0—200, 300, 600, 800, 900, 1100, 1300, 1600, 1800°С	ТХК, ТХА, ТПР, ТПП	Сигнал эдс; напряжение постоянного тока 0—10, 20, 50, 75, 100, 200, 500 мВ
	МР-64	1; 1,5	То же	0—50, 100, 150, 300, 400, 500°С	ТСП, ТСМ	
	МВР-6	0,5; 1	»	От —70 до +180 и от —50 до +50°С		
	МВУ-6	0,5; 1	»	700—1400, 800—1600, 900—1800, 1200—2000°С	РАПИР	
			Содержание газа	0—20%, 0—2%	Газоанализаторы	
Логометры (неуравновешенные мосты)	Л-64 ЛПр ЛР-64	1,5	Температура	От —70 до +180 и от —50 до +50°С; 0—100, 0—300, 0—400, 0—500°С	ТСП, ТСМ	Напряжение постоянного тока 0—10, 20, 50, 75, 100 мВ
Уравновешенные мосты	КПМ, КВМ	0,5	То же	От —70 до +180, от —50 до +50°С; 0—100, 0—300, 0—400, 0—500°С	ТСП, ТСМ	Напряжение постоянного тока
	КСМ1—КСМ4	0,5	Напряжение	0—10, 20, 50, 75, 100, 200, 500 мВ	Реостатные преобразователи	
Автоматические потенциометры	КПП, КВП	0,5	Температура	От —50 до +200°С; 0—100, 200, 300, 600, 800, 900, 1100°С	ТХК, ТХА	Сигнал эдс, напряжение постоянного тока

Продолжение табл. 7

Наименование	Тип	Класс точности	Измеряемый параметр	Диапазон измерений	Первичный преобразователь	Вид выходного сигнала
Миллиамперметры и вольтметры	КСП1—КСП3	0,25; 0,5	Температура	0—1100; 1300; 1600; 1800; 500—1300°С	ТПР, ТПП	Напряжение и постоянный ток
				700—1400; 800—1600; 900—1800; 1200—2000°С	РАПИР	
	КСП3	0,5	Напряжение	0—10, 20, 50, 75, 100, 200, 500 мВ	—	
	М1530, М1730, КВУ, КПУ, КСУ1—КСУ4	0,5	Ток и напряжение	0—5 мА; 0,20 мА; 0—10 В	Манометры, расходомеры, уровнемеры с преобразованием измерительного сигнала в сигнал постоянного тока со встроенными преобразователями ПЭ, ЛП, КМП	

ли вторую серию АКЭСР2, которая является более надежной и компактной. Кроме того, имеется возможность сопряжения приборов этой серии с логическими, защитными и вычислительными подсистемами.

§ 73. Исполнительные механизмы автоматических регуляторов

Исполнительные механизмы (ИМ) преобразуют подводимую энергию в перестановочное усиление для перемещения регулирующего органа в положение, соответствующее командному сигналу. В зависимости от вида энергии, используемой для создания перестановочного усилия, исполнительные механизмы разделяют на электрические, пневматические и гидравлические. В теплоэнергетике чаще всего применяют электрические исполнительные механизмы.

Электрический исполнительный механизм МЭО состоит из двух основных элементов: сервопривода, который содержит трехфазный асинхронный электродвигатель переменного тока, сочлененный с двухступенчатым редуктором, и колонки дистанционного управления (КДУ).

На выходном валу сервопривода крепится рычаг для сочленения с регулирующим органом и профилированный кулачок для сочленения с тягой указателя положения. Полный ход сервопривода рассчитан на поворот выходного вала на 90°. Время полного поворота T_c называется временем сервопривода. В зависимости от модификации сервопривода оно составляет 60, 30 или 15 с. Сервоприводы развивают тяговое усилие до 4000 Н·м (РБ-400). Для ручного управления сервоприводом имеется выдвижной штурвал. Колонка дистанционного управления КДУ (рис. 108) служит для управления сервоприводом. Внутри колонки размещаются плата зажимов *1*, панель *2*, концевые выключатели *5* и датчик указателя положения. На задней стороне панели находятся понижающий трансформатор, электрический выпрямительный мост постоянного тока и потенциометр для настройки указателя положения.

Выходной вал редуктора через профилированный кулачок и тягу *6* передает усилие на рычаг *4*, который перемещает движок *8* потенциометрического датчика *9*. Датчик включен в электрическую цепь прибора и имеет шкалу от 0 до 100% угла поворота. Когда движок потенциометра достигает крайних положений, подвижные контакты концевых выключателей отходят от неподвижных, цепь управления электродвигателем разрывается. С помощью регули-

Продолжение табл. 7

Наименование	Тип	Класс точности	Измеряемый параметр	Диапазон измерений	Первичный преобразователь	Вид выходного сигнала
Приборы с дифференциально-трансформаторной измерительной схемой	ВМД, КВД, КПД, КПД1, КПД2, КПД4, КСД3	0,5	Расход, уровень, давление вещества	В единицах расхода, уровня, давления с верхним пределом $A \cdot 10^n$ ($A = 1; 1{,}25; 1{,}6; 2; 2{,}5; 3{,}2; 4; 5; 6{,}3; 8$; $n = -1; 0; 1; 2$)	Манометры, расходомеры, уровнемеры со встроенными ПД	Сигналы переменного тока 50 Гц со взаимной индуктивностью 0—10 и 10—0—10 мГн, которой соответствуют напряжения 0—2 В (1—3 В) и (—1)—0—(+1) В
	ДМ, ДП, ЭИВ, ДС, ДСМ					
Ферродинамические приборы	ВФП, ВФС, КСФ3	1	Расход вещества	То же	Манометры, расходомеры, уровнемеры со встроенными ПД и ПФ	Сигналы переменного тока 50 Гц со взаимной индуктивностью 0—20 мГн (0—2 В), 10—0—10 мГн; (—1)—0—(+1) В
Частотные приборы	ВЧП, ВЧС	1	Количество вещества за заданное время	В единицах количества вещества (время интегрирования от 3 мин до 125 ч, а амплитуда от 1 до 10 В)	Расходомеры со встроенными преобразователями ПС и ПГ	Сигналы переменного тока частотой 4—8 кГц
	ИНП, ИЧС, СЧ, С	0,5				

ровочных винтов 7 устанавливается предельный угол поворота выходного вала. Колонки дистанционного управления снабжают также путевыми выключателями для ограничения диапазона перемещения регулирующего органа в автоматическом режиме, датчиками положения регулирующего органа, тормозными устройствами для уменьшения выбега выходного вала при остановке электродвигателя. Все исполнительные механизмы имеют свою марки-

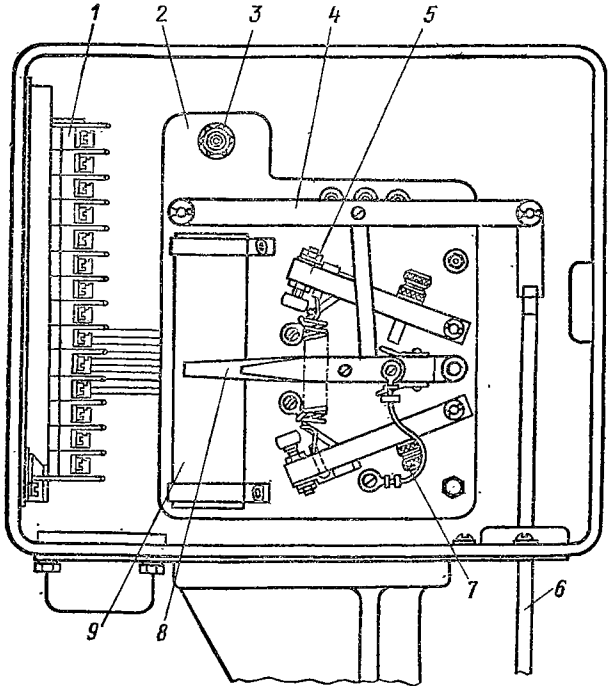


Рис. 108. Колонка дистанционного управления КДУ-1:
1 — плата зажимов, *2* — панель, *3* — винты крепления, *4* — рычаг, *5* — концевые выключатели, *6* — тяга, *7* — регулировочные винты, *8* — движок, *9* — датчик

ровку. Например, исполнительные механизмы Чебоксарского завода электрических исполнительных механизмов обозначают МЭО-400/63-0,25, что означает механизм электрический однооборотный, развивающий номинальный крутящий момент на валу 4000 Н·м, время полного хода выходного вала исполнительного механизма 63 с, номинальный полный ход выходного вала исполнительного механизма 0,63 оборота.

3. Какие виды унифицированных сигналов применяют в ГСП?
4. Какие встроенные передающие преобразователи используют в первичных приборах?
5. Для чего нужны нормирующие преобразователи ПТ-ТП-68 и ПТ-ТС-68?
6. По какому принципу работают измерительные преобразователи?
7. Как возникает напряжение на вторичных обмотках дифференциально-трансформаторного преобразователя?
8. Для чего нужны электропневматические и пневмоэлектрические преобразователи?
9. Назовите основные элементы вторичных приборов и расскажите об их назначении.

ГЛАВА IV

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ, РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ И РАЗРЕЖЕНИЯ

§ 25. Общие сведения

Давление — наиболее распространенный измеряемый параметр на ТЭС. Так, в системе пылеприготовления измеряют давление воздуха перед мельницей для определения надежности подачи угольной пыли к горелкам, перепад давления на мельнице — для определения качества помола угля. Без измерения давления сжигаемого газа невозможна безопасная работа газотопливного хозяйства. В котельных установках измеряют давление пара в барабане, по которому контролируют эффективность сжигания топлива и теплоотдачи к трубам в топке, а также безопасность работы котельного оборудования, давление перегретого первичного и вторичного пара для определения экономичности работы энергоблока, отложений солей на внутренней поверхности трубопроводов. Для оценки работоспособности насосов и вентиляторов измеряют давление питательной воды, пара для эжекторов и продувки форсунок, воздуха после воздухоподогревателя, т. е. во всех напорных линиях трубопроводов, и разрежение дымовых газов в верхней части топки, вакуум в конденсаторе турбины.

Давление как физическая величина определяется в виде энергии вещества (жидкость или газ), отнесенной к единице объема, и является наряду с температурой основным параметром его физического состояния. Воздействие давления вещества на внешний объект проявляется в виде силы F, действующей на единицу площади S, т. е. $p=F/S$.

В СИ за единицу давления принят паскаль (Па). Пас-

Схема управления исполнительным механизмом с колонкой дистанционного управления КДУ-1 показана на рис. 109. Дистанционное управление осуществляется с помощью ключа управления *КУ*, автоматическое управле-

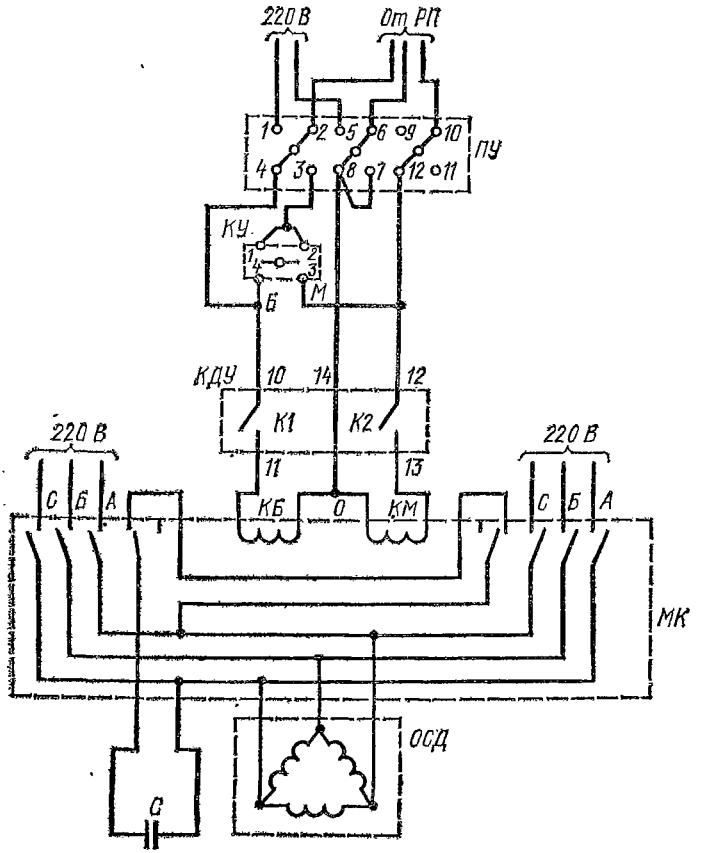


Рис. 109. Схема управления исполнительным механизмом с колонкой дистанционного управления КДУ-1

ние — от регулирующего прибора *РП* при установке переключателя управления в положение *А* («автоматически»). В режиме дистанционного управления переключатель *ПУ* замыкает зажимы *1—3*, *5—7*. Одна из фаз переменного тока 220 В соединяется через зажим *14* с общей точкой *О* катушек магнитного контактора *МК*. Если ключ управления *КУ* поворачивают в сторону *Б* («больше»), то вторая

каль — давление силы в один ньютон на площадь в один квадратный метр (Па=1 Н/м²). Широко применяют кратные единицы кПа и МПа.

При измерениях различают абсолютное вакуумметрическое и избыточное давления. Под *абсолютным* давлением понимается полное давление, которое равно сумме атмосферного и избыточного $p_{абс}=p+p_{ат}$. *Вакуумметрическое* давление ниже атмосферного $p_в=p_{ат}-p_{абс}$.

Приборы давления в зависимости от измеряемой величины разделяют на манометры (для измерения избыточного или абсолютного давления), барометры (для измерения атмосферного давления), вакуумметры (для измерения вакуумметрического давления).

Манометры, предназначенные для измерения малых избыточных давлений (до 40 кПа), называют *напоромерами*, а предназначенные для измерения малых вакуумметрических давлений (до 40 кПа) — *тягомерами*. Приборы давления, которые имеют двустороннюю шкалу с пределами измерения ±20 кПа, называют *тягонапоромерами* (значение нуль на шкале соответствует атмосферному давлению). Для измерения разности давлений используют *дифференциальные манометры* (дифманометры).

По принципу действия чувствительного элемента приборы для измерения давления разделяют на жидкостные, деформационные, грузопоршневые и электрические. В качестве образцовых, по которым осуществляется поверка рабочих приборов, применяют грузопоршневые манометры.

Передача сигнала, получаемого от чувствительного элемента первичного преобразователя к вторичным автоматическим приборам, осуществляется либо механически в показывающих приборах, либо с помощью преобразователей дифференциально-трансформаторных, ферродинамических, с магнитной или силовой компенсацией и тензопреобразователей «Сапфир».

§ 26. Жидкостные приборы давления

В жидкостных приборах давления измеряемая величина компенсируется столбом жидкости, отнесенным к единице его поперечного сечения. В основу действия таких приборов положен метод сообщающихся сосудов.

Жидкостные приборы давления используют в качестве манометров для измерения давления неагрессивных газов вплоть до 0,1 МПа, тягомеров для измерения разрежения $p_в$ до 7000 Па, вакуумметров для измерения вакуума $p_в$

фаза тока 220 В через переключатель управления и зажимы *10—11 КДУ* соединяется с катушкой *КБ* магнитного контактора. На обмотки статора электродвигателя *ОСД* поступает трехфазное напряжение в определенной последовательности подключения фаз (*С*, *Б*, *А*), в результате чего он начнет вращаться в сторону «больше», открывая регулирующий орган. Если ключ поворачивается в сторону *М* («меньше»), под напряжением окажется катушка *КМ* и магнитный контактор сработает в сторону «меньше». При другой последовательности включения фаз *А*, *Б*, *С* электродвигатель начинает вращаться в другую сторону.

Выходной вал будет вращаться до тех пор, пока ключ управления не вернется в нейтральное положение или произойдет размыкание контактов с помощью концевого выключателя *К2*, т. е. выходной рычаг редуктора достигнет предельного угла поворота.

В автоматическом режиме переключатель управления устанавливается в положение «автоматически». При появлении сигнала на выходных зажимах *7—8* катушки *КБ* или *8—9* катушки *КМ* электродвигатель срабатывает в сторону «больше» или «меньше». При размыкании контактов концевых выключателей *К1* и *К2* разрывается электрическая цепь питания катушки *КБ* или *КМ* и возвращается в исходное положение подвижный контактор *МК* с нормально разомкнутыми силовыми контактами, в результате чего электродвигатель останавливается.

§ 74. Пусковые устройства электрических двигателей исполнительных механизмов

Пусковые устройства (пускатели) электродвигателей исполнительных механизмов подразделяют на контактные и бесконтактные. Контактные пускатели ПМРТ-69 выполняют на базе магнитных реверсивных контакторов, каждый из которых имеет три нормально разомкнутых силовых контакта, включенных в цепь питания электродвигателя. Кроме того, пусковые устройства имеют тормозное устройство, выполненное на базе электрического конденсатора и подключаемое через размыкающие контакты *К1.5*, *К2.5* к одной из статорных обмоток электродвигателя *Эд* (рис. 110). При замыкании любой группы силовых контактов размыкаются вспомогательные контакты *К1.5*, *К2.5* и конденсатор *С* отключается от электродвигателя. После размыкания силовых контактов ротор электродвигателя, двигаясь по инерции, взаимодействует с остаточным

до 0,1 МПа и дифференциальных манометров для измерения разности давлений неагрессивных жидкостей, паров и газов до 0,07 МПа. Их применяют на ТЭС в качестве приборов, устанавливаемых по месту эксплуатации отдельных узлов оборудования или на площадках обслуживания, а также в качестве образцовых при поверке рабочих приборов, рассчитанных на те же диапазоны измерения давления, разрежения или разности давлений.

Жидкостные приборы давления бывают двух видов: U-образные (двухтрубные) и чашечные (однотрубные) манометры.

Схема U-образного манометра показана на рис. 41, *а*. Прибор представляет собой изогнутую стеклян-



Рис. 41. Схемы жидкостных манометров:
а — U-образного, *б* — чашечного; *1* — трубки, *2* — шкала, *3* — жидкость, *4* — дуга, *5*, *7* — винты, *6* — уровень, *8* — сосуд, *9* — вытеснитель

магнитным полем статора и наводит в его обмотках эдс. Вспомогательные контакты, замыкая цепь статорной обмотки конденсатора C, создают в статоре собственное магнитное поле. Взаимодействие магнитного поля ротора и ста-

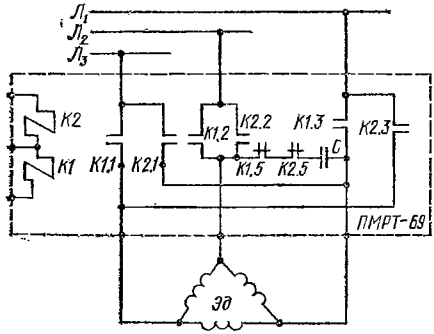


Рис. 110. Схема включения магнитного пускателя ПМРТ-69:
Л1—Л3 — линии электропитания

тора вызывает противодействующий вращению тормозной эффект, который препятствует выбегу исполнительного механизма. Основным недостатком контактных пускателей является невысокая надежность (подгорание контактов, «замыкание»). Бесконтактные пускатели бо-

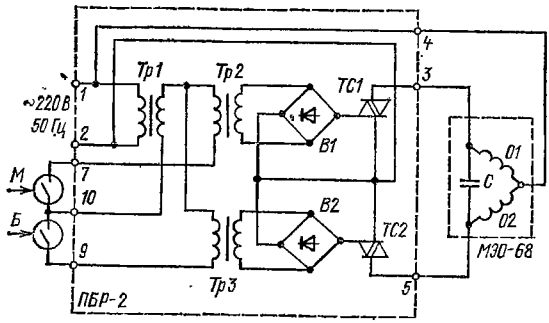


Рис. 111. Электрическая схема управления исполнительным механизмом с помощью пускателя ПБР-2-1

лее надежны и выполняются на базе магнитных усилителей или тиристорных схем.

Рассмотрим способ управления исполнительным механизмом с помощью бесконтактного тиристорного пускателя ПБР-2-1 (рис. 111). Пускатель может работать с механиз-

ную трубку *1*, заполненную до половины жидкостью *3* (вода, ртуть). Трубку закрепляют по отвесу вертикально на твердом основании и по ее высоте наносят шкалу *2* в миллиметрах. Измеряемая величина уравновешивается и определяется столбом h рабочей жидкости, равным сумме столбов h_1 и h_2 в обоих коленах трубки. При измерении давления или разрежения один конец трубки оставляют открытым, а другой соединяют с объектом измерения, а при измерении разности давлений к обоим концам трубки подводят измеряемые давления.

Результат измерения давления обычно выражается в миллиметрах водяного или ртутного столба. Для получения давления в паскалях используют формулу $p=hg\rho$, где g — местное ускорение свободного падения; ρ — плотность рабочей жидкости.

При измерении давления U-образным манометром возможны погрешности: из-за отклонения значений ускорения g и плотности ρ от расчетных; ошибок в считывании показаний h_1 и h_2 вследствие неправильного нанесения шкалы *2*; неравномерности температурного расширения шкалы, стекла и рабочей жидкости.

Схема чашечного (однотрубного) манометра показана на рис. 41, *б*. Одна из трубок заменена широким сосудом *8*, сообщающимся с измерительной стеклянной трубкой *1*. Площадь сечения сосуда значительно больше, чем площадь сечения измерительной трубки.

При измерении давления или разности давлений большее из них подается в сосуд, а меньшее — в измерительную трубку.

Под действием измеряемого давления жидкость в трубке поднимается на высоту h_1, а в сосуде опускается на h_2, при этом высота столба жидкости, соответствующего измеряемой величине, равна сумме h_1 и h_2. Однако, если отношение площадей поперечных сечений сосуда и трубки больше 400, величиной h_2 (изменением уровня в сосуде) можно пренебречь и отсчет вести только по уровню жидкости в трубке.

В этом случае ошибка считывания показаний по сравнению с U-образными приборами уменьшается в 2 раза, а остальные ошибки измерения давления те же, что и для U-образных приборов.

При измерении малых давлений, разрежений или разностей давлений применяют однотрубные микроманометры ММН с наклонной измерительной трубкой (рис. 41, *б*),

мами МЭО с однофазным электродвигателем. Два тиристорных ключа *ТС1* и *ТС2* управляются сигналами оператора или от регулирующих блоков. Они включаются в цепи статорных обмоток электродвигателя. Если сигналы на ключи не поступают, то они разомкнуты и обмотки обесточены. При появлении сигнала *М* («меньше») замыкается ключ *ТС1* (тиристор) и к обмотке *О1* подсоединяется источник питания 220 В, а на другую обмотку *О2* питание поступает через фазосдвигающий конденсатор *С*, при этом электродвигатель начинает вращаться в сторону «меньше». При подаче на ключ *ТС2* сигнала *Б* («больше») включается обмотка *О2*, а питание на обмотку *О1* поступает через фазосдвигающий конденсатор *С*, при этом электродвигатель вращается в сторону «больше». Напряжение на тиристоры подается с выпрямителей *В1* и *В2* через разделительные трансформаторы *Тр2*, *Тр3*. Питание на пускатель ПБР-2 подается от сети 220 В через трансформатор *Тр1*.

§ 75. Регулирующие органы теплоэнергетических установок

Устройство, предназначенное для изменения расхода регулируемой среды, энергии или каких-либо других величин в соответствии с требованиями технологии, называется *регулирующим органом*.

В теплоэнергетике наибольшее распространение получили регулирующие органы, которые изменяют величину потока вещества или его расходы.

Конструктивное исполнение регулирующих органов зависит от условий работы теплоэнергетических установок. Их характеристики должны соответствовать заданным требованиям. При непрерывном регулировании необходимо, чтобы пропускная характеристика регулирующего органа была строго определенной, а при двухпозиционном регулировании важно соотношение между временем его открытия и закрытия.

Для регулирования расходов газов и жидкостей применяют дроссельные регулирующие органы. Рассмотрим некоторые виды регулирующих органов дроссельного типа.

На рис. 112 показан шиберный регулирующий орган (шибер), основным элементом которого является затвор *1*, перемещающийся перпендикулярно направлению потока *Q*. Обычно этот вид регулирующих органов используют для регулирования потока газов и воздуха. Шиберы устанавливают в каналах *2* круглого, прямо-

которые являются более точными (класс точности 0,5 или 1), чем другие приборы, и применяются в лабораториях и промышленных условиях при испытаниях оборудования ТЭС.

Показания микроманометра при измерениях определяют по длине столбика l рабочей жидкости трубки *1*, имеющей угол наклона α. При этом жидкость поднимается на высоту $h_1=l\sin\alpha$. Если прибор заполнен жидкостью с плотностью, указанной на нем, то давление в паскалях $p=lK=l\rho\sin\alpha$ (где K — постоянное значение прибора). Прибор ММН рассчитан на пять диапазонов измерения (0 — 0,5; 0—0,75; 0 — 1; 0 — 1,5 и 0 — 2 кПа), которым соответствует определенное значение K, указанное рядом с отверстиями на установочной дуге *4*. Прибор снабжен уровнем *7* и установочными винтами *5* и *6*. Для установки на шкале нулевого значения давления в сосуде *8* имеется вытеснитель *9*. Наклонная трубка *1* фиксируется с помощью дуги *4*.

Разновидностью однотрубных манометров являются *поплавковые дифманометры* ДП. В отличие от рассмотренных выше приборов в широком сосуде дифманометра, куда подается большее давление, находится поплавок, который перемещается, следуя за изменением уровня рабочей жидкости. Основной недостаток этих приборов — необходимость передачи перемещений поплавка, расположенного внутри сосуда высокого давления, к отсчетному устройству.

В качестве образцовых или лабораторных средств измерений давления в диапазоне от 10^{-1} до 10^{23} Па используют грузопоршневые манометры МП (классов точности 0,02; 0,05), которые также работают по методу сообщающихся сосудов. Измеряемое давление в них уравновешивается силой тяжести поршня с грузами.

Высокая точность воспроизведения и измерения давления в этих манометрах определяется высокой точностью заданной массы грузов и площади поперечного сечения поршня.

Принцип действия барометров основан на уравновешивании атмосферного давления давлением ртутного столба, заключенного в барометрической трубке. Погрешность считывания в этих приборах не превышает $\pm0{,}1$ мм, что объясняется введением оптического устройства — нониуса, совмещаемого с границей мениска ртути. Во избежание влияния капиллярных сил на показания барометров диаметр их трубок должен быть не менее 8 мм.

угольного или другой формы сечения. Их рабочие характеристики можно получать любой формы, изменяя профиль затвора. Кроме пропускной характеристики шибера необходимо учитывать наибольшее усилие для перемещения затвора: $P=K\Delta pF+G$, где Δp — перепад давления на ши-

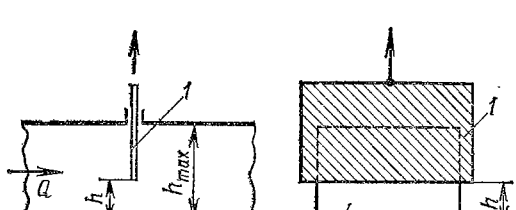


Рис. 112. Шиберный регулирующий орган

бере; F — площадь подвижной части шибера, на которую действует давление; K — коэффициент трения; G — масса подвижной части.

В зависимости от условий работы (температура, агрессивность среды) шиберы изготовляют из стали, чугуна, легированных сталей или со спецпокрытиями.

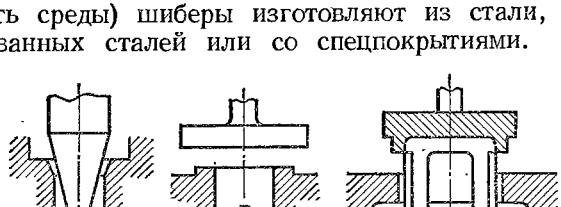


Рис. 113. Регулирующие клапаны:
а — игольчатый, *б* — тарельчатый, *в* — золотниковый

Другим широко распространенным регулирующим органом являются р е г у л и р у ю щ и е к л а п а н ы, конструкция которых зависит от требований технологии. Некоторые виды регулирующих клапанов показаны на рис. 113. Они отличаются формой плунжера (подвижной части) и седла. В игольчатых (рис. 113, *а*) и тарельчатых (рис. 113, *б*) клапанах запирающая и дросселирующая поверхности выполняют плоскими или коническими. Тарельчатые клапаны изнашиваются быстрее и меняются их рабочие характерис-

§ 27. Приборы для измерения давления и разности давлений с упругой деформацией чувствительных элементов

Приборы для измерения давления, основанные на упругой деформации чувствительных элементов под действием измеряемой величины, широко применяют на ТЭС в диапазоне от 50 Па до 1000 МПа. Деформация или сила, пропорциональная давлению, преобразуется в показания прибо-

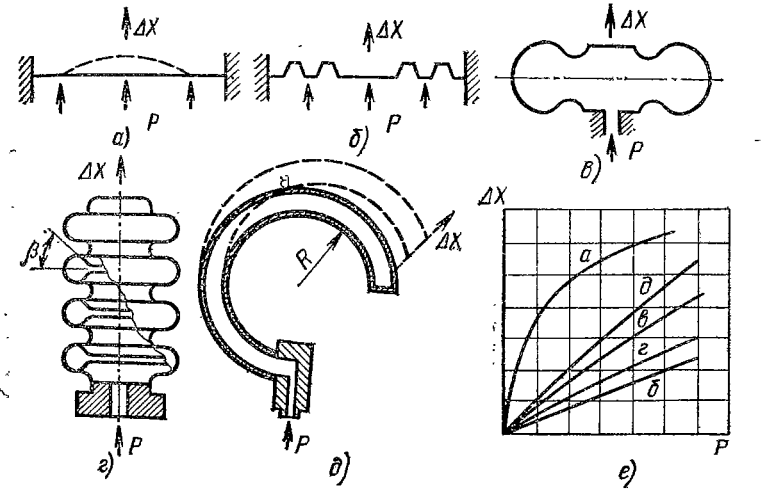


Рис. 42. Упругие чувствительные элементы приборов для измерения давления (*а*, *б* — мембраны, *в* — мембранная коробка, *г* — сильфон, *д* — трубчатая пружина) и их статические характеристики (*е*)

ра или в изменения выходного сигнала. Такие приборы изготовляют в виде тягомеров, напоромеров, манометров и вакуумметров.

В качестве упругих чувствительных элементов приборов для измерения давления применяют мембраны (рис. 42, *а*, *б*), мембранные коробки (рис. 42, *в*), сильфоны (рис. 42, *г*), трубчатые пружины (рис. 42, *д*). Мембраны, мембранные коробки и сильфоны используют также и в дифманометрах.

Чувствительный элемент прибора характеризуется зависимостью перемещения его рабочей точки ΔX от действующего давления или разности давлений p (рис. 42, *е*). Обычно эту зависимость в приборе стремятся получить линейной, для чего используют прочные сплавы цветных металлов с высоким модулем упругости. С ростом измеря-

тики, поэтому эти клапаны применяют как запорные органы или при двухпозиционном регулировании. Для больших расходов служат игольчатые клапаны.

Клапаны с фигурным затвором называют золотниковыми (рис. 113, *в*). Различная конфигурация затвора позволяет изменять его рабочую характеристику и частично снимать одностороннее действие силы статического давления среды.

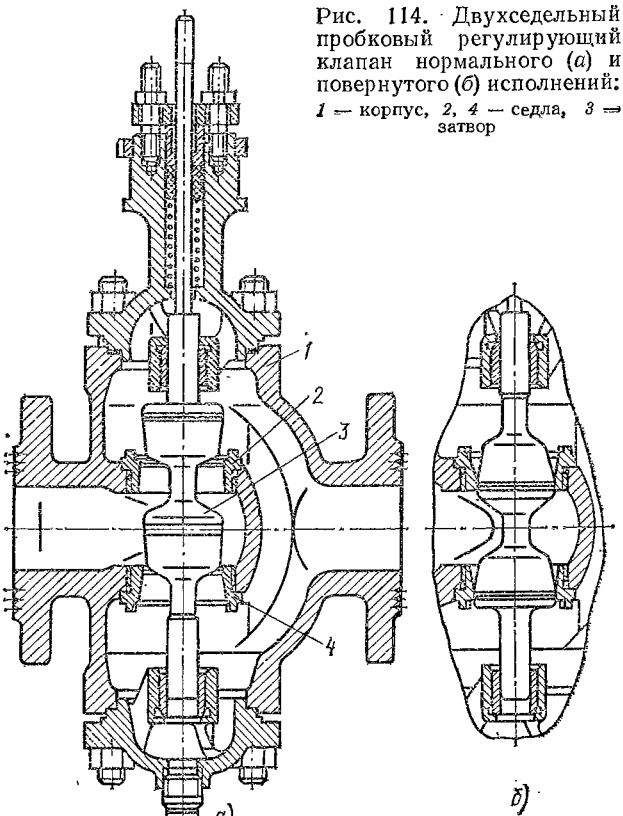


Рис. 114. Двухседельный пробковый регулирующий клапан нормального (*а*) и повернутого (*б*) исполнений: *1* — корпус, *2*, *4* — седла, *3* — затвор

Двухседельные регулирующие клапаны (рис. 114) имеют два седла *2*, *4* и затвор *3*, проходящий через эти седла. Основное их достоинство состоит в том, что разгружается затвор от одностороннего действия силы, создаваемой статическим давлением среды. Для двухседельных пробковых регулирующих органов характерна довольно большая не-

емого давления упругие деформации перейдут в пластические и зависимость ΔX от p станет нелинейной. При эксплуатации приборов давления зона упругих деформаций может уменьшиться из-за повышения температуры окружающей среды, поэтому первичные приборы приходится размещать вдали от горячих объектов. Кроме того, с течением времени из-за циклических нагрузок под действием давления упругие свойства чувствительных элементов утрачиваются и накапливаются пластические деформации. Таким образом, оба эти фактора отрицательно влияют на надежность чувствительных элементов приборов давления, что необходимо учитывать при их эксплуатации.

Рассмотрим подробнее приборы для измерения давления с различными упругими чувствительными элементами.

Манометры с трубчатой пружиной в большинстве случаев являются приборами, в которых измеряемое давление последовательно преобразуется в перемещение незакрепленного конца пружины и связанного с ним показывающего, регистрирующего, сигнализирующего устройства (в первичных приборах) или преобразователем давления в унифицированный электрический сигнал (в схемах дистанционной передачи сигналов вторичному прибору).

В настоящее время выпускают показывающие и самопишущие манометры с одновитковой (МТ) и многовитковой (МТМ) трубчатой пружиной. Верхний предел измеряемого давления определяется стандартным рядом $(0{,}6;\ 1;\ 1{,}6;\ 2{,}5;\ 4)\cdot 10^n$ МПа, где $n = -1;\ 0;\ 1;\ 2;\ 3$. Пружинные вакуумметры имеют диапазон измерения от —0,1 до 0 МПа.

Принцип действия манометров с трубчатой пружиной показан на рис. 43, где изображен манометр МТ. Чувствительный элемент манометра выполнен в виде полой одновитковой трубчатой пружины *3*, центральная ось которой представляет собой дугу окружности с углом 200—270°. Один конец пружины, в который через радиальный штуцер *5* поступает давление, закреплен, а второй (закрытый) может перемещаться. Сечение трубчатых пружин может быть в виде эллипсоида (пружина Бурдона) или плоскоовальное.

При подаче в трубку давления сечение деформируется (пунктирные линии см. на рис. 42, *д*) и пружина стремится распрямиться, перемещаясь в направлении величины ΔX. Ее чувствительность тем больше, чем больше радиус кривизны R и чем меньше толщина стенки сечения δ.

Трубчато-пружинные манометры МЭД выпускают с дифференциально-трансформаторными преобразователями,

встроенными в корпус прибора. Другие манометры МПЭ выпускают с преобразователями магнитной или силовой компенсации. Верхние пределы измерений давления этих манометров от 4 до 60 МПа и от 4 до 100 МПа.

В пружинных манометрах применяют также пневматические преобразователи, позволяющие получать на выходе унифицированный сигнал по давлению воздуха. Такие манометры типа МП-П выпускают на те же пределы измерений, что и МПЭ.

Для сигнализации предельных отклонений давле-

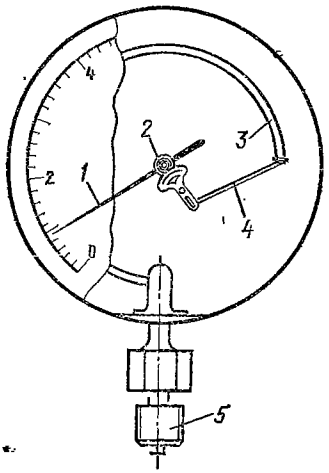


Рис. 43. Устройство манометра с одновитковой пружиной: *1* — стрелка, *2*, *3* — пружины, *4* — поводок, *5* — штуцер

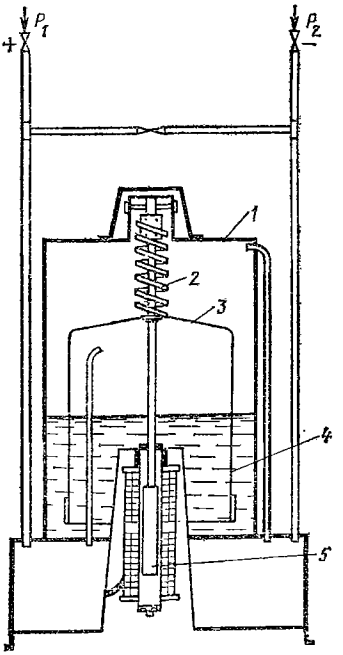


Рис. 44. Схема колокольного дифманометра ДКО

ния в цепях защиты и позиционного регулирования служат электроконтактные манометры, в которых дополнительно введены стрелки с электроконтактами, устанавливаемыми напротив сигнализируемого значения давления. Показывающая стрелка также имеет контакт. При ее совмещении с любой дополнительной стрелкой возникает электрический сигнал.

Разновидностью приборов для измерения давления с упругой пружиной в качестве чувствительного элемента являются колокольные дифманометры, предназначенные

дач. Желательно, чтобы рабочая характеристика регулирующего органа была линейной в координатах «положение выходного рычага сервопривода регулятора — расход регулирующей среды». В этом случае соединение может быть рычажного, кулачкового, редукторного или тросового вида.

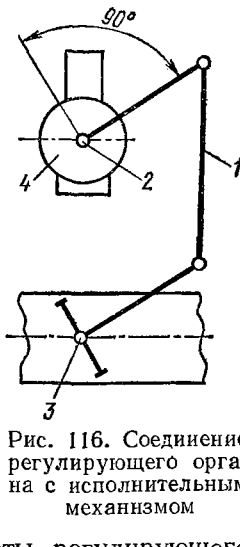


Рис. 116. Соединение регулирующего органа с исполнительным механизмом

Рассмотрим схему соединения исполнительного механизма колонки дистанционного управления КДУ с регулирующим органом *3* (рис. 116), в которой необходимо обеспечить, чтобы полный ход штока *1* регулирующего органа *3* соответствовал повороту рычага выходного вала *2* исполнительного механизма *4* на угол $\gamma=90°$. Подбором кинематических связей (рычагов) можно добиться работы регулирующего органа в заданном диапазоне.

§ 76. Пневматические регуляторы

Наряду с электрическими средствами автоматического регулирования в настоящее время в промышленности широко применяют средства пневмоавтоматики. Особенностями пневмоавтоматики являются надежность и возможность использования ее в местах, опасных в пожарном и взрывоопасном отношении.

Развитие пневмоавтоматики шло от агрегатного к элементному принципу построения систем промышленной автоматики, т. е. устройство собиралось из пневмоэлементов универсального назначения. Это стало возможным на базе разработки и освоения универсальной системы элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА).

В систему УСЭППА входят пневмоемкости, пневмосопротивления, усилители, повторители, пневмореле, органы управления и другие элементы общего и специального назначения. Московским заводом «Тизприбор» освоена система пневмоавтоматики «Старт».

Все элементы системы УСЭППА объединяются в схемах на платах с внутренними коммутационными каналами. Рассмотрим принцип действия некоторых базовых элементов пневматики и построение на их основе пневматического регулятора, реализующего типовые законы регулирования.

для дистанционного измерения разности давлений, избыточного и вакуумметрического давлений. Колокольный дифманометр ДКО представляет собой неподвижный полый сосуд *1* с двумя воздушными емкостями, в которые подаются измеряемые давления и где определяется их разность. К сосуду *1* с помощью упругой пружины *2* подвешен другой полый сосуд (колокол) *3*, погруженный в разделительную жидкость *4*. При отсутствии сигнала о разности давлений сосуд *3* находится в нижнем положении. Если под колокол подать большее давление, он поднимется вверх, сжимая пружину *2* и перемещая плунжер *5* дифференциально-трансформаторного преобразователя, встроенного в прибор. Выходным сигналом прибора служит напряжение переменного тока от 0 до 2 В. Вторичными могут быть приборы ДСР, ДПР, ЭИВ и др. В модифицированных дифманометрах ДКОФ применяют ферродинамические преобразователи.

В другой группе приборов для измерения давления чувствительные элементы выполняют в виде сильфона. Сильфон (см. рис. 42, *г*) представляет собой тонкостенную трубку с кольцевыми гофрами на боковой поверхности. Его упругость определяется материалом и толщиной стенки, числом гофр и их кривизной. Первичные приборы с сильфоном выпускаются показывающими (индекс «П») и самопишущими (индекс «С»). Поскольку сильфоны более чувствительны к изменению давления, чем трубчатые пружины, приборы с ними применяют для измерения сравнительно небольших разрежений и давлений.

В приборы для измерения давления с сильфоном для дистанционной передачи измерительных сигналов встраивают следующие измерительные преобразователи: с компенсацией магнитных потоков; электрические ПЭ или пневматические ПП с силовой компенсацией. Пневматические преобразователи с силовой компенсацией используют в напоромерах НС-Э(П), тягомерах ТС-Э(П), тягонапоромерах ГНС-Э(П), манометрах МС-Э(П), дифманометрах ДС-Э(П).

Самыми разнообразными по конструкции чувствительных элементов являются приборы с мембранными элементами. Плоская мембрана (см. рис. 42, *а*) представляет собой гибкую пластину, закрепленную по окружности. При подаче давления в одну из камер, разделенных мембраной, центр ее окружности перемещается на величину ΔX. Статическая характеристика плоской мембраны имеет нелинейный вид, поэтому такие мембраны в приборах давления

На рис. 117 показана схема дроссельного сумматора, в которой выполняется суммирование двух пневматических сигналов p_1 и p_2. В схеме используются два дросселя: регулируемый *2* и постоянный *3*. В регулируемом дросселе сигнал p_1 изменяется, проходя через регулируемое отверстие в оловянной втулке. С помощью регулировочного винта *1* можно изменять площадь сечения втулки, вследствие чего изменяется до и после отверстия перепад давлений воздуха и его расход. Постоянный дроссель *3* имеет постоянный перепад давлений и расход воздуха. Два входных штуцера для давлений p_1 и p_2 и выходной для $p_{вых}$ крепятся на одной плате, что облегчает монтаж и обслуживание элементов пневматики.

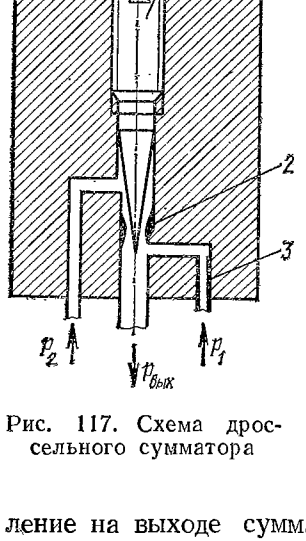


Рис. 117. Схема дроссельного сумматора

Суммирование сигналов выполняют по формуле $p_{вых}=K_1p_1+K_2p_2$, где $p_{вых}$ — избыточное давление на выходе сумматора (выходной сигнал); p_1, p_2 — входные суммируемые сигналы, которые изменяются в диапазоне от 0 до 100 кПа; K_1, K_2 — коэффициенты входных сигналов, изменяющиеся от 0 до 1 и связанные зависимостью $K_1+K_2=1$

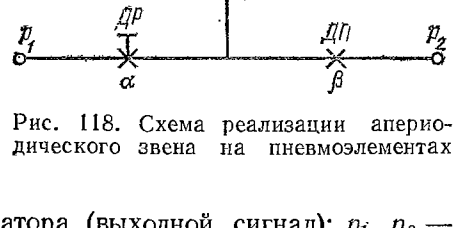


Рис. 118. Схема реализации апериодического звена на пневмоэлементах

Обычно дроссельные сумматоры работают совместно с пневмоемкостями, которые представляют собой металлические герметичные камеры объемом 40—50 см³ с входным и выходным штуцерами. Рассмотрим схему на пневмоэлементах, реализующую апериодическое звено (рис. 118). Основными ее элементами являются постоянный *ДП*, регулируемый *ДР* дроссели и пневмоемкость *V*.

Регулируемый дроссель может иметь шкалу. Суммирование сигналов происходит после их дросселирования. Расход воздуха через постоянный дроссель определяется про-

не используют. Для линеаризации статической характеристики применяют гофрированные мембраны (см. рис. 42, *б*) и мембранные коробки (см. рис. 42, *в*). Чаще всего используют мембранные коробки, жесткость которых меньше, чем жесткость отдельной мембраны. Это приводит к росту крутизны статической характеристики и увеличению зоны перемещений, пропорциональных приложенному давлению.

Мембранные чувствительные элементы имеют статическую характеристику зависимости (ΔX от p) более крутую, чем сильфоны, что позволяет широко использовать их для измерения малых напоров и разрежений.

Различные мембраны, так же как и другие чувствительные элементы, применяют в показывающих и самопишущих первичных приборах прямого действия и в бесшкальных приборах со встроенными преобразователями давления в унифицированный сигнал с силовой компенсацией.

На ТЭС используют следующие мембранные приборы для измерения давления: манометры ММЭ с унифицированным электрическим сигналом, МАДМЭ и дифманометры ДМЭ, ДМЭР. Эти приборы имеют класс точности 1 и 1,5.

Основные типы мембранных приборов для измерения давления и их технические характеристики приведены в табл. 8.

§ 28. Электрические манометры

В отличие от первичных приборов давления и приборов со встроенными преобразователями (давление — перемещение — унифицированный электрический сигнал) существуют электрические приборы давления, в чувствительных элементах которых происходит прямое преобразование давления в электрический измерительный сигнал.

Рассмотрим электрические манометры, принцип действия которых основан на зависимости электрического сопротивления веществ от измеряемого давления. Их называют *тензопреобразователями*. Тензопреобразователи изготовляют из полупроводников, константана, платины, сплавов меди и никеля. В приборах давления их используют в качестве чувствительных элементов, механически соединенных с мембраной или пружиной прибора, которая деформируется под действием измеряемого давления.

В последнее время в промышленности получили распространение приборы для измерения давления «Сапфир» (рис. 45, *а*), в которых в качестве чувствительного элемента

водимостью β, а через регулируемый дроссель — проводимостью α. Рассматривая изменение давлений через регулируемый и нерегулируемый дроссели, соединенные по предложенной схеме, можно найти математическое описание в виде апериодического звена.

Применяют также мембранные сумматоры (рис. 119), которые наряду с суммированием двух сигналов преобразовывают результирующий сигнал в непрерывный выходной пневматический, изменяющийся от 20 до 100кПа. На схеме показан трехмембранный сумматор, состоящий из четырех камер *А*, *Б*, *В*, *Г*, которые разделены жесткими резинотканевыми мембранами *1*, связанными по оси *2* жестким центром. Сумматор работает по принципу пневмосопротивлений сопло — заслонка. Мембранный блок может перемещаться в вертикальном направлении. Эффективная площадь средней мембраны значительно больше крайних. Камеры *А* и *Г* соединяются выходом $p_{вых}$. К верхнему штуцеру подводится давление питания $p_{пит}=140$ кПа, нижний штуцер соединен с атмосферой $p_{атм}$. К камерам *Б* и *В* подводят штуцера входных суммируемых сигналов p_1 и p_2. При подаче сигналов в эти камеры, являющиеся глухими емкостями, на мембранах возникают усилия, пропорциональные их эффективной площади. При увеличении давления p_1 выходное давление $p_{вых}$ возрастает, а при увеличении давления p_2 — оно снижается, поэтому камеру *В* называют положительной, а камеру *Б* — отрицательной. При подаче на вход трехмембранного сумматора сигналов p_1 и p_2 в зависимости от их соотношения происходит прикрытие заслонки на штуцере связи с давлением $p_{пит}$ или $p_{атм}$. Общее уравнение этой зависимости: $p_{вых}=p_{пит}$ при $p_1>p_2$; $p_{вых}=p_{атм}$ при $p_1<p_2$. Это означает, что элемент будет работать, как двухпозиционный регулятор. В таком режиме работа сумматора из-за различных возмущений по давлению имеет неустойчивый характер. Для повышения устойчивости его охватывают обратной связью, т. е. соединяют импульсными трубками штуцера $p_{вых}$ и p_2, тогда, если коэф-

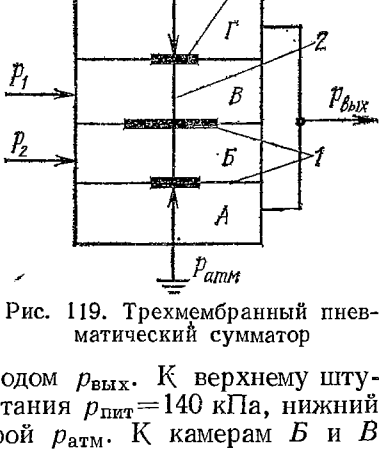


Рис. 119. Трехмембранный пневматический сумматор

Таблица 8. **Рабочие приборы для измерения давления**

Наименование	Тип	Пределы измерений		Класс точности
		нижний	верхний	
Показывающие или самопишущие приборы прямого действия: жидкостные	Мановакуумметр V-образный	1; 2,5; 4; 6 кПа	1; 2,5; 4; 6 кПа	1,5
	ТНЖ	—(0,4; 0,63; 1; 1,6) кПа	0,4; 0,63; 1; 1,6 кПа	1,5
с трубчатой пружиной	МТ МТМ	0	От 0,06 до 160 МПа	1; 1,5
	ВТ МВТ	—0,1 МПа —0,1 МПа	0 От 0,06 до 2,4 МПа	1,5; 2,5
сильфонные	МСП (с), ЭКМ МВСП (с) ВСП (с)	0 —0,1 МПа —0,06; —0,1 МПа	От 0,025 до 0,4 МПа 0,06; 0,15; 0,3 МПа 0	1; 1,5
	ТмСП (с)	От —0,16 до —40 кПа	0	1; 1,5
	НСП (с) ТНСП (с)	0 От —0,08 до —20 кПа	От 0,16 до 40 кПа От 0,08 до 20 кПа	2,5

фициент обратной связи близок к 1, сумматор работает в качестве повторителя входного сигнала.

На этом принципе выполняют сумматоры с большим количеством мембран, в результате чего возможности преобразования сигналов расширяются.

Схема алгебраического суммирования трех сигналов p_1, p_2 и p_3 с отрицательной обратной связью *ООС* показана на рис. 120, *а*, схема сравнения p_1—p_4 — на рис. 120, *б*. Для

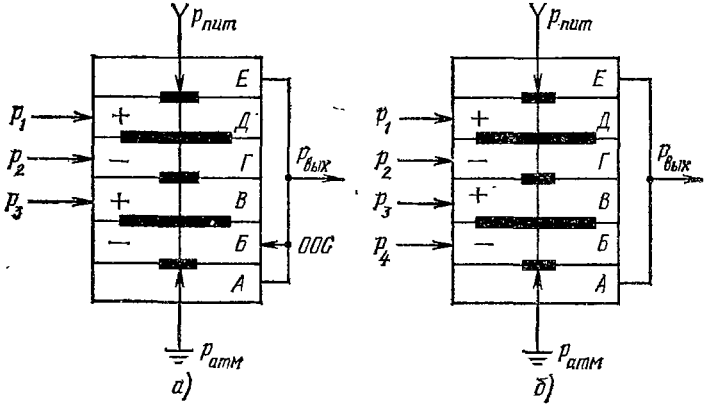


Рис. 120. Схемы на пятимембранном сумматоре:
а — алгебраического суммирования трех сигналов, *б* — сравнения четырех сигналов

первой схемы справедливо уравнение $p_{вых}=p_1-p_2+p_3$, а для второй схемы $p_{вых}=(p_1+p_3)-(p_2+p_4)$.

На пневмоэлементах выполняют пневматические регуляторы, которые представляют собой единый блок и выпускаются различных модификаций. Рассмотрим промышленный регулятор ПР2.5, схема которого показана на рис. 121. Регулятор состоит из четырехмембранного, трехмембранного и дроссельного сумматоров. В комплект этого регулятора, реализующего П-закон регулирования, входит усилитель мощности и ручной задатчик (на схеме не показаны). Четырехмембранный сумматор *СМ-1* выполняет роль блока сравнения или измерительного блока и работает в режиме пневмоповторителя. На его вход поступают сигналы p_0 (от ручного задатчика), p_3 (от задатчика вторичного измерительного прибора) и $p_т$ (от задатчика регулируемой величины). С мембранного сумматора *СМ-1* сигнал небаланса в виде алгебраической суммы входных сигналов $p_р=p_3-p_т+p_0$ поступает на вход дроссельного, а затем,

Продолжение табл. 8

Наименование	Тип	Пределы измерений		Класс точности
		нижний	верхний	
мембранные	НМП	0	От 0,16 до 40 кПа	1,5; 2,5
	ТММП	От —0,16 до —40 кПа	0	
		От —0,08 до —20 кПа	От 0,08 до 20 кПа	
Бесшкальные приборы со встроенными дифференциально-трансформаторными преобразователями и трубчатой пружиной	МЭД:			
манометры		0	От 0,1 до 160 МПа	1
мановакуумметры		—0,1 МПа	От 0,06 до 2,4 МПа	
вакуумметры		—0,1 МПа	0	
Бесшкальные приборы со встроенными преобразователями с компенсацией магнитных потоков:				
с трубчатой пружиной	ВПЭ	—0,06; —0,1 МПа	0	1
	МПЭ		От 0,06 до 160 МПа	
	МВПЭ	—0,1 МПа	От 0,06 до 2,5 МПа	
мембранные	ММЭ	0	От 0,16 до 160 МПа	
	МАДМЭ	0	От 0,06 до 0,1 МПа	
Бесшкальные приборы со встроенными преобразователями с силовой компенсацией:				
пружинные	МП-Э (П)	0	От 4 до 100 МПа	0,5; 1
	МСВ-Э (П)	0	От 100 до 1000 МПа	

пройдя через регулируемый дроссель *ДР* и суммируясь с сигналом $p_{вых}$, пропущенным через постоянный дроссель *ДП*,— на трехмембранный сумматор *СМ-2* в виде суммы $p_{рк}=K_1p_р+K_2p_{вых}$.

Сигнал $p_{рк}$ с выхода дроссельного сумматора сравнивается в трехмембранном сумматоре *СМ-2* с заданным значением регулируемой величины $p_о$. Выходной сигнал $p_{вых}$ усиливается усилителем мощности и поступает на вход мембранного исполнительного механизма, перемещающего регулирующий орган.

Регулятор реализует пропорциональный закон регулирования. С помощью винта на регулируемом дросселе *ДР*

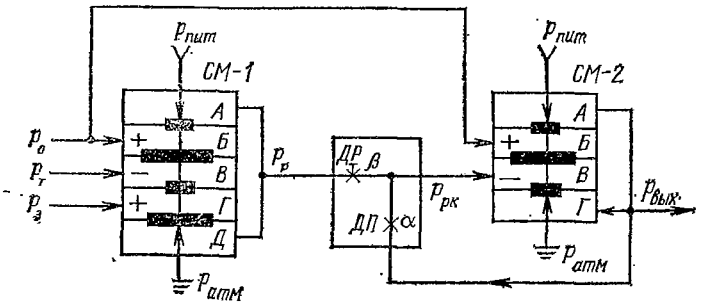


Рис. 121. Схема промышленного регулятора ПР2.5

устанавливается коэффициент усиления $K_р$, изменяющийся от 0,03 до 20. Выходное давление регулятора изменяется в пределах 20—100 кПа.

Контрольные вопросы

1. Какие виды регуляторов вы знаете?
2. Как различают регуляторы в зависимости от используемого вида внешней энергии?
3. Из каких основных элементов состоит регулятор?
4. Для чего в регуляторах применяют усилитель?
5. Каковы основные особенности аппаратуры «Каскад»?
6. Как работает измерительный блок И-04?
7. Каковы основные особенности регулирующей аппаратуры АКЭСР?
8. Какие регулирующие блоки АКЭСР вы знаете?
9. Что называют исполнительным механизмом?
10. В чем состоит способ управления исполнительным механизмом с помощью тиристорного пускателя?

Продолжение табл. 8

Наименование	Тип	Пределы измерений		Класс точности
		нижний	верхний	
сильфонные	МАС-Э (П)	0	От 0,025 до 2,5 МПа	1,5; 2
	МС-Э (П)	0	От 0,04 до 2,5 МПа	
	МВС-Э (П)	—0,1 МПа	От 0,06 до 2,4 МПа	
	ВС-Э (П)	—0,0025; —0,04; —0,06; —0,1 МПа	0	
	ТС-Э (П)	От —0,4 до —40 кПа	0	
	НС-Э (П)	0	От 0,4 до 40 кПа	1,5; 1
	ТНС-ЭП	От —0,2 до —20 кПа	От 0,2 до 20 кПа	
«Сапфир-22» (электрические приборы для измерения давления)	ДА	0	От 0,1 до 10 МПа	0,5
	ДВ	—0,1 МПа	0	
	ДИ	0	От 0,1 до 160 МПа	

Примечание. Стандартный ряд верхних пределов приборов для измерений давления: манометров избыточного давления (0,6; 1; 1,6; 2,5; 4)·10^n МПа, где $n=-1; 0; 1; 2; 3$; манометров абсолютного давления (2,5; 4; 6; 10; 16; 25)·10^nМПа, где $n=-2; -1$; мановакуумметров 0,06; 0,15; 0,3; 0,5; 0,9; 1,5; 2,4 МПа; напоромеров и тягомеров $\pm$(1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40)·10^n МПа, где $n=-1; 0$; тягонапоромеров $\pm$(0,8; 1,25; 2; 3; 5; 8; 12,5; 20)·10^n кПа, где $n=-1; 0$.

ГЛАВА XII

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

§ 77. Общие сведения

Управление теплоэнергетическими установками должно обеспечивать наряду с выработкой теплоты поддержание ряда качественных показателей работы оборудования. При этом основные регулируемые параметры должны изменяться в очень узких заданных диапазонах. Как уже указывалось, для котлов основными режимными параметрами считают регулирование горения, питания и температуры перегретого пара, поступающего на турбину. Отклонения этих параметров происходят в результате изменения нагрузки котлов и качественного состава топлива, качества питательной воды, воздействий, связанных с изменением давления и температуры питательной воды и других возмущений. Кроме того, на структуру средств управления влияют конструктивные особенности теплоэнергетической установки, ее мощности и режимы эксплуатации.

Регулирование заданных параметров можно выполнить, используя наиболее приемлемый закон управления или структурную схему управления. Оба способа требуют привлечения средств управления, способных решить поставленные задачи.

Рассмотрим основные системы регулирования для барабанного и прямоточного котлов.

§ 78. Автоматическое регулирование барабанных котлов

Основным требованием, предъявляемым к котлам, является выработка заданного количества пара с установленными качественными показателями. Как уже говорилось, барабанные паровые котлы выполняют так, что питательная вода и пар разделены барабаном, в котором происходит парообразование.

Постоянство давления вырабатываемого пара обеспечивает экономичную работу турбины. По принятым нормам отклонение давления пара в установившемся режиме не должно превышать $\pm 2\%$ номинального. При этом выработка пара котлом зависит от теплоты, выделяющейся в топке при сгорании топлива. Недостаточное количество топлива приводит к снижению давления пара. Топливо, поступаю-

служит сапфировая мембрана с напыленными полупроводниковыми сопротивлениями. Тензопреобразователи из полупроводников по сравнению с металлическими обладают большей чувствительностью, малыми размерами и массой. Измерительная схема приборов «Сапфир» (рис. 45, *б*) представляет собой электрический мост, в плечи которого установлены тензопреобразователи *3*, располагаемые симметрично на мембране *2*, воспринимающей измеряемое давление. Сигнал небаланса моста усиливается, и на выходе преобразователя *1* (рис. 45, *а*) получается унифицированный токовый сигнал (0—3 мА при сопротивлении нагрузки до 2,5 кОм). Приборы «Сапфир» выпускают следующих модификаций: манометры ДА, вакуумметры ДВ, дифманометры ДИ. Пределы их измерений приведены в табл. 8.

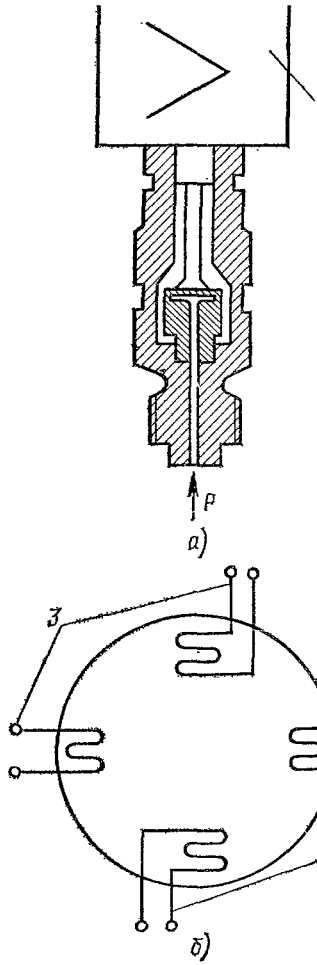


Рис. 45. Электрический прибор для измерения давления (*а*) и схема расположения тензопреобразователей на его чувствительном элементе — мембране (*б*)

Для измерения высоких давлений (до 1000 МПа) применяют тензопреобразователи из манганина. В приборах для измерения давления чувствительные элементы из этого материала выполняют в виде катушек. Сопротивления катушек под давлением определяют с помощью мостовых измерительных схем (см. гл. II), а при необходимости точных измерений — потенциометрами.

Недостатками приборов «Сапфир» являются необходи-

щее в топку, должно сжигаться с полным отбором теплоты, для чего в топку подают дутьевыми вентиляторами определенное количество воздуха. Правильное соотношение топлива и воздуха обеспечивает экономичный режим горения топлива: $V_в = \alpha V_т$, где α — коэффициент избытка воздуха; $V_в$ — оптимальное количество подаваемого воздуха; $V_т$ — теоретически необходимое количество воздуха.

Избыток подаваемого воздуха по сравнению с оптимальным приводит к потерям теплоты с топочными газами, а недостаточная подача воздуха — к потерям теплоты с химическим и механическим недожогом (неполное сгорание топлива).

Экономичное сгорание топлива должно быть устойчивым. Показателем устойчивости процесса горения является степень разрежения в верхней части топки.

Таким образом регулирование процесса горения в барабанном котле должно поддерживать тепловую нагрузку, воздействуя на расход топлива и воздуха, а также устойчивость процесса горения, воздействуя на разрежение в топке котла. Автоматическую систему регулирования горения снабжают регуляторами, поддерживающими близко к заданным значениям следующие параметры: давление перегретого пара $p_{пп}$ и тепловую нагрузку $Q_т$; избыток воздуха в топке и по газовому тракту (по O_2), чем обеспечивается экономичность процесса горения; разрежение в верхней части топки $S_т$.

Способы и схемы автоматического регулирования тепловой нагрузки котла и давления пара определяются тепловой схемой подсоединения паропровода перегретого пара к турбине и режимом работы котла.

Котел может работать в *базовом режиме*, когда длительное время поддерживается постоянная нагрузка. *Регулирующий режим* котла связан с колебаниями нагрузки, т. е. котел должен дополнительно вырабатывать пар при его нехватке или снижать его выработку при излишках для нужд турбины. Котел к турбине подсоединяют через общую магистраль, когда все котлы работают на общий паропровод, от которого пар подается к турбинам или пар от котла подводится к одной турбине (блочная компоновка). При параллельной работе котлов в общей магистрали поддерживается давление $p_м$. Регулятор, обеспечивающий это давление, называют *главным*. Он управляет нагрузкой всех котлов, работающих на общую магистраль.

Рассмотрим схему регулирования давления пара перед турбиной, показанную на рис. 122. Формирующим сигна-

мость индивидуальной градуировки и зависимость показаний прибора от температуры измеряемого объекта. Из-за последнего недостатка приходится вводить в измерительную схему приборов с тензопреобразователями устройства термокомпенсации.

Принцип действия других электрических приборов для измерения давления основан на использовании пьезоэлектрического эффекта. Эти приборы применяют главным образом при исследованиях и испытаниях основного оборудования ТЭС. Эффект связан с появлением электростатических зарядов на гранях кристаллов кварца при их деформации вдоль оси перпендикулярно этим граням. Кристаллы выполняют в виде двух пластин, механически соединенных с мембраной, на которую воздействует измеряемое давление. Пьезокварцевые манометры позволяют измерять давление до 100 МПа и широко применяются при измерении циклически меняющихся давлений большой частоты. Чувствительность таких преобразователей можно повысить, используя большее количество кварцевых пластин, увеличивая активную площадь мембраны или удлиняя пластину.

Недостатками пьезокварцевых манометров является низкая точность измерения статического давления из-за утечки электрического заряда, а достоинством их — низкая температурная погрешность.

§ 29. Методика измерения давления в рабочих условиях

Метод и средства измерений давления выбирают в зависимости от требуемой точности, условий проведения измерений, диапазона измеряемых давлений, способов отбора давления и его подвода к измерительным приборам. При этом имеют в виду точность, которую приборы смогут обеспечить в реальных условиях эксплуатации на ТЭС.

Исходя из надежности работы приборов, конечное значение их шкалы выбирают таким, чтобы оно превышало измеряемую величину при стабильном давлении в 1,5 раза, а при колеблющемся — в 2 раза. В обоих случаях минимальное измеряемое давление должно быть не меньше $^1/_3$ диапазона шкалы прибора.

Показания манометров с упругими чувствительными элементами зависят от температуры, поэтому их устанавливают так, чтобы исключить влияние температуры измеряемой и окружающей среды. Дополнительная погрешность этих манометров составляет 0,4% на каждые 10°С.

Место отбора давления в жидких средах не рекоменду-

лом на регулятор *1* подачи топлива является сигнал по давлению пара перед турбиной $p_{пп}$.

Схема может работать при блочной компоновке агрегатов. В регулирующем режиме воздействие осуществляется на регулятор *1* подачи топлива, который по сигналу давления $p_{пп}$ (линия *а*) изменяет расход топлива в топку, а значит, и тепловую нагрузку котла. Частота вращения турбины стабилизируется регулятором *5*, входом для которого

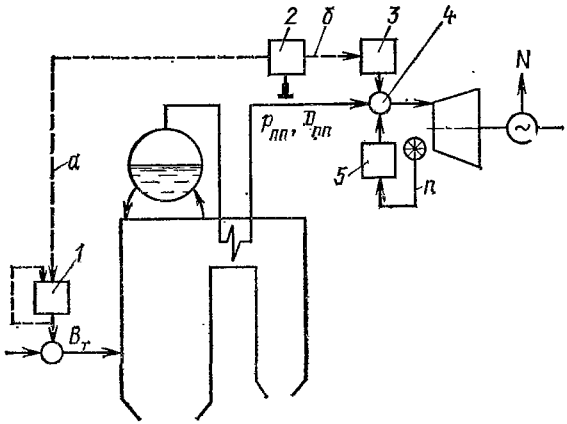


Рис. 122. Схема регулирования давления пара перед турбиной:
n — число оборотов турбины, *N* — мощность генератора

является сигнал по числу оборотов турбины. Обычно в схеме регулирования давления для блочной компоновки агрегатов используют регулятор, работающий по ПИ-закону регулирования.

В базовом режиме, когда при чрезмерном увеличении нагрузки турбины запас котла по паропроизводительности исчерпывается, давление пара ограничивается воздействием на синхронизатор *3* турбины (линия *б*). Сигнал по давлению пара от регулятора *2* поступает на синхронизатор *3*, который воздействует на клапаны турбины *4*. В базовом режиме регулятор *2* выполняет П-закон регулирования, т. е. действует с некоторой неравномерностью по давлению в зависимости от нагрузки.

При регулировании давления пара группы котлов, объединенных общим паропроводом, применяют схему, показанную на рис. 123. В этой схеме используют главный регулятор давления *3*, который по отклонению давления $p_м$ в общем паропроводе формирует сигнал для регуляторов топ-

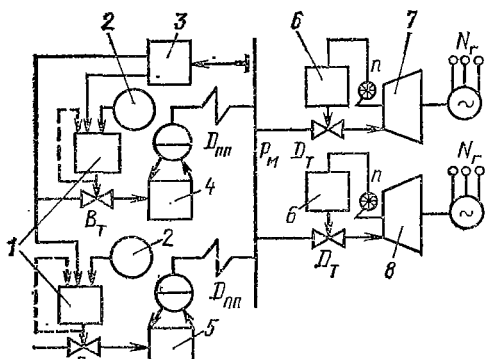
ется выбирать в нижних и верхних точках трубопроводов (во избежание попадания шламов, взвесей и газов в импульсные линии, передающие измеряемый сигнал по давлению от отборного устройства к первичному прибору), а в газовых средах — в нижних точках (во избежание попадания влаги в импульсные линии). Длина импульсных линий не должна превышать 50 м, так как с ее ростом увеличивается запаздывание (инерционность) в показаниях приборов для измерения давления, при этом внутренний диаметр линий должен быть от 6 до 15 мм. Необходимо, чтобы устройства отбора давления не вызывали возмущения течения среды, т. е. края отверстий в стенках трубопроводов не выступали в ее поток.

Давление на важных, с точки зрения надежной эксплуатации, технологических участках (давление питательной воды, перегретого пара) измеряют первичными манометрами, снабженными передающими преобразователями ко вторичным приборам, расположенным на БШУ. Для контроля давления различных сред в вспомогательных объектах на ТЭС применяют показывающие манометры прямого действия, устанавливаемые по месту или на местном щите управления в удобных для монтажа и обслуживания пунктах, не подверженных действию вибраций, высокой температуры, агрессивных газов, водяных паров. Для показывающих манометров устанавливаются следующие рабочие условия эксплуатации: температура окружающей среды $t^\circ = 5 \div 50^\circ$С, влажность от 30 до 80%; рабочее положение приборов вертикальное, штуцером вниз. Приборы для измерения давления с дистанционной передачей измерительных сигналов должны быть удалены от источников магнитных полей (электродвигателей, трансформаторов).

Рассмотрим схемы установки манометров для измерения давления газов, жидкостей и пара. Схема установки манометра на трубопроводах с паром или питательной водой ($p = 10 \div 40$ МПа, $t^\circ > 70^\circ$С) показана на рис. 46, *а*. Для обеспечения продувки импульсной линии *4*, подключения контрольного манометра, включения и отключения рабочего манометра *1* используют трехходовой вентиль *2*. Для предохранения манометра от действия горячей среды на импульсной линии устанавливают кольцо *3*, в котором происходит конденсация пара и охлаждение его до температуры окружающей среды. Для ремонта импульсной линии предусмотрен запорный вентиль *5*. Если манометр устанавливают на расстоянии от трубопровода более 5 м, кольцо *3* не ставят (рис. 46, *б*).

лива *1*. Доля участия каждого котла в регулировании суммарной паровой нагрузки устанавливается задатчиком ручного управления *2*.

Эта схема хорошо отрабатывает внешние возмущения по нагрузке, идущие от турбины, при внутренних возмущени-



Рнс. 123. Схема регулирования давления пара в общем паропроводе с главным регулятором:

1 — регуляторы подачи топлива, *2* — задатчик ручного управления, *3* — главный регулятор давления пара, *4*, *5* — котлы, *6* — регуляторы частоты вращения турбины, *7*, *8* — турбины

ях, например со стороны топливоподающих устройств; она имеет большую инерционность. Кроме того, внезапное изменение подачи топлива на одном из котлов приводит к перераспределению суммарной нагрузки между агрегатами, что вызывает недогрузку одних и перегрузку других.

Для улучшения работы таких систем регулирования в регулятор топлива вводится корректирующий сигнал по фактическому расходу топлива $B_т$ на котел.

Схема регулирования давления пара с главным регулятором и стабилизацией расхода топлива на котел показана на рис. 124. Введение сигнала по расходу топлива $B_т$ позволяет уменьшить инерционность схемы, так как регулирование давления начинается не с момента его снижения в общей магистрали, а с момента изменения подачи топлива $B_т$. Доля участия каждого котла в поддержании нагрузки устанавливается, как в предыдущей схеме, задатчиком ручного управления *2*. Однако эта схема, известная под названием «задание — топливо», используется эффективно лишь для котлов, работающих на жидком и газообразном топ-

Приборы для измерения давления лучше всего размещать так, чтобы на них дополнительно не действовало давление столба жидкости в линии, иначе в показания манометра вводится указываемая на приборе поправка со знаком «+» (если манометр расположен выше места отбора давления) и «—» (если прибор расположен ниже). При температуре среды более 25°С также вводится поправка к показаниям на каждые 10°С. При измерении пульсирующего давления (например, в напорной линии насосов) для его сглаживания перед манометром устанавливают дроссель.

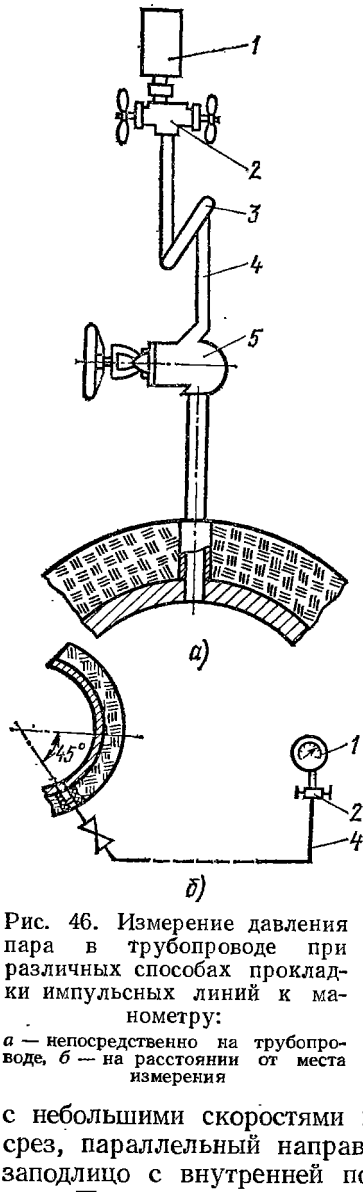


Рис. 46. Измерение давления пара в трубопроводе при различных способах прокладки импульсных линий к манометру:
а — непосредственно на трубопроводе, *б* — на расстоянии от места измерения

В котлоагрегатах на ТЭС необходимо контролировать близкое к атмосферному давление газовых сред в топке, газоходах, воздухопроводах. С этой целью используют тягомеры, напоромеры или тягонапоромеры.

Для измерения напора в газовоздухопроводах используют схему подсоединений импульсных линий к первичному прибору *1* (рис. 47). Из газовоздухопровода *4* с помощью отборного устройства *5* давление по импульсной трубке *3* подается к крану-переключателю *2*, который обеспечивает подключение к одному прибору *1* нескольких импульсных линий. Отборные устройства *5*, устанавливаемые в местах с небольшими скоростями газа, должны иметь на конце срез, параллельный направлению потока и выполненный заподлицо с внутренней поверхностью стенки трубопровода. При измерении давления влажного газа соединитель-

ливах, так как надежные способы непрерывного измерения расхода твердого топлива отсутствуют.

Для котлов, работающих на твердом топливе, применяют схему «задание — теплота». Известно, что тепловая нагрузка может быть выражена расходом пара, который вырабатывается котлом и идет на парообразование. Для установившегося режима работы котла это соотношение выполняется. Но в переходных режимах, например при увеличении нагрузки, часть теплоты тратится на нагрев пароводяной смеси и металла поверхностей нагрева котла. Для учета этого явления в регулятор топлива через дифференциатор вводится исчезающий сигнал по давлению пара в барабане котла $p_б$. Схема регулирования подачи топлива «задание — теплота» (рис. 125) подобна схеме «задание — топливо», но вместо сигнала $B_т$ в регулятор вводится сигнал по теплоте, который формируется двумя параметрами — расходом пара на турбину $P_{пп}$ и скоростью изменения давления пара в барабане котла $p_б$. Доля участия каждого котла в регулировании общей паровой нагрузки устанавливается задатчиком ручного управления *3* на регуляторах топлива *5* и *6*. Эти регуляторы устраняют топочные возмущения, стабилизируя расход топлива в установившемся режиме, а главный регулятор *2* выполняет роль регулятора тепловой нагрузки котла, компенсируя возмущения, поступающие при изменении нагрузки турбины.

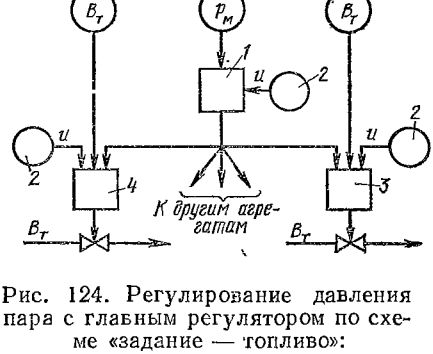


Рис. 124. Регулирование давления пара с главным регулятором по схеме «задание — топливо»:

1 — главный регулятор, *2* — задатчик ручного управления, *3*, *4* — регуляторы топлива

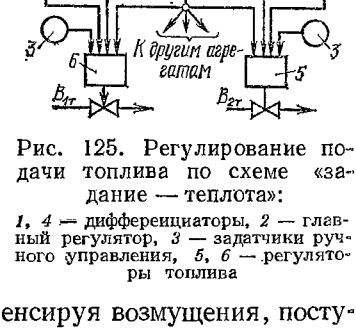


Рис. 125. Регулирование подачи топлива по схеме «задание — теплота»:

1, *4* — дифференциаторы, *2* — главный регулятор, *3* — задатчики ручного управления, *5*, *6* — регуляторы топлива

Оптимальный режим сжигания топлива в топках паровых котлов является необходимым условием повышения

ная линия должна иметь уклон в сторону отборного устройства. Если это невозможно, в низких точках линии устанавливают конденсатосборники. В верхней части горизонтальных и наклонных участков газовоздухопроводов размещают отборные устройства.

На ТЭС приходится измерять давление запыленных воздушных потоков, при этом пыль может отложиться в

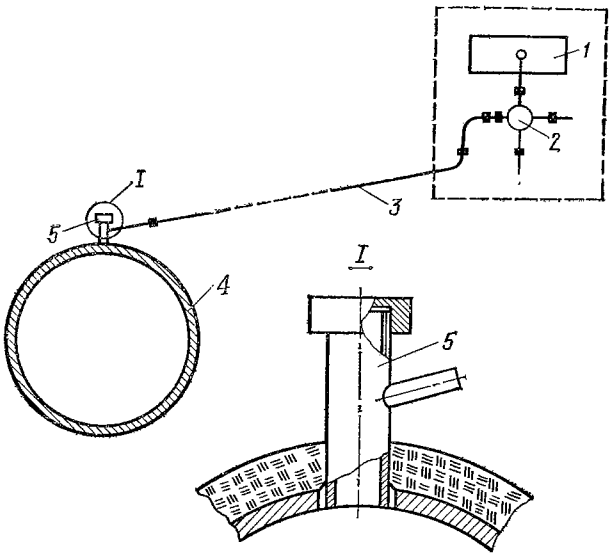


Рис. 47. Схема подсоединений импульсных линий к объекту при измерении в нем давления газа напоромером или тягомером

импульсной линии и попасть в прибор. Поэтому в отборном устройстве устанавливают циклон, который отделяет воздух от пыли и подает его по импульсной линии к прибору.

При измерении разрежения в топке котла учитывают наличие пульсаций. Для обеспечения нормальной работы упругих элементов приборов необходимо устанавливать в импульсных линиях пневматические дроссели.

Отборные устройства и импульсные линии для устранения пыли и влаги периодически продувают сжатым воздухом под давлением 0,1—0,3 МПа.

Вакуумметр присоединяют к конденсатору турбины так, чтобы на результаты измерения не влиял скоростной напор отработавшего пара. Образование влаги в импульсных линиях также может сильно исказить показания прибора.

их кпд (отношение полезной теплоты, использованной на генерацию пара, ко всей теплоте, выделившейся при сжигании топлива): $\eta_к = D_{пп}(i_0 - i_{пв})/(B_т Q_р^н)$, где $D_{пп}$ — расход перегретого пара; i_0, $i_{пв}$ — энтальпии перегретого пара и питательной воды; $B_т$ — расход топлива; $Q_р^н$ — низшая рабочая теплотворная способность топлива.

Сжигание различных видов топлива в паровых котлах имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при регулировании экономичности процесса горения.

Расход природного газа и мазута в трубопроводах можно легко измерить, что облегчает поддержание оптимального соотношения «топливо — воздух», но сернистый мазут необходимо сжигать с малыми избытками воздуха ($\alpha = 1{,}005 \div 1{,}04$) во избежание низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева. Полное сжигание твердого топлива определяется его тониной помола, зольностью, влажностью и другими факторами.

Одним из наиболее распространенных способов оценки экономичности процесса горения является анализ состава топочных газов, покидающих топку. Для корректировки оптимального соотношения «топливо — воздух» используют сигнал по содержанию кислорода O_2 в уходящих газах. Объектом регулирования принято считать топочную камеру и примыкающий к ней газоход конвективного пароперегревателя до места измерения содержания кислорода в топочных газах. Оптимальное значение содержания кислорода в уходящих газах для твердого топлива поддерживается от 3 до 4%, а для газообразного топлива — значительно меньше.

Основным способом регулирования оптимального значения избытка воздуха является воздействие с помощью дутьевых вентиляторов на количество вдуваемого воздуха в топку. Регулирование может быть общим на котел, на каждую горелку или на группу горелок. Выбор схемы регулирования зависит от конструктивных особенностей установки и режима работы котла.

Для котлов на газообразном топливе используют схему «топливо — воздух», показанную на рис. 126. Формирующими сигналами для регулятора *1* выбирают сигнал по расходу топлива $B_т$ и сигнал $\Delta p_{вп}$, являющийся разностью перепадов давления на газопроводе $p_г$ и воздухоподогревателе $p_{вп}$: $\Delta p_{вп} = p_г - p_{вп}$.

Регулятор *1* управляет производительностью дутьевых вентиляторов.

Экономичность котлов на твердом топливе зависит от

Поэтому эти линии прокладывают без перегибов с уклоном не менее 10° и с установкой конденсатоотводчиков. Все места соединений тщательно уплотняют.

При измерениях давления в трубопроводах *1* агрессивных сред, а также сред, застывающих при обычных температурах воздуха (например, мазут), в местах отбора давления размещают мембранные или жидкостные разделительные сосуды (рис. 48, *а*, *б*).

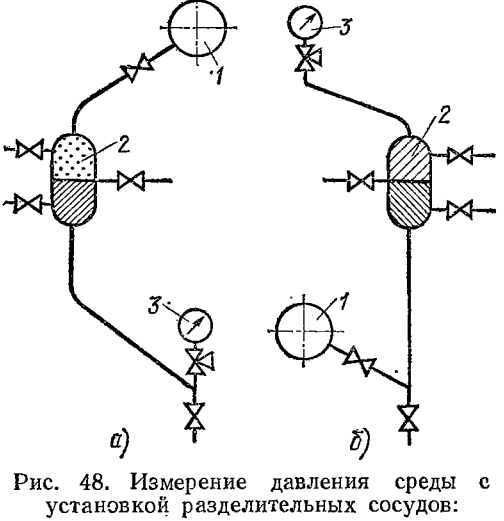


Рис. 48. Измерение давления среды с установкой разделительных сосудов:
а — при плотности агрессивной среды меньше плотности нейтральной жидкости, *б* — при плотности агрессивной среды больше плотности нейтральной жидкости

В мембранном разделительном сосуде *2* внутреннюю полость пружины манометра *3* и пространство до мембраны заполняют специальной жидкостью, при этом жесткость мембраны разделительного сосуда должна быть намного меньше жесткости чувствительного элемента прибора. Мембранные разделители вносят в показания прибора дополнительную погрешность около 1%.

В жидкостных разделительных сосудах применяют нейтральную жидкость, контактирующую с пружиной манометра и с агрессивной средой, давление которой измеряют, при этом плотность жидкости должна существенно отличаться от плотности измеряемой среды.

Показания манометров обеспечивают не только экономичную, но и безопасную работу энергетического оборудова-

точности непрерывного измерения расхода топлива, поэтому для этих котлов используют схему регулирования «теплота — воздух» (рис. 127). Выбор формирующего (первого) сигнала по теплоте обусловлен тем, что тепловыделение в топке эквивалентно тепловой нагрузке котла. Этот сигнал формируется двумя параметрами: расходом перегретого пара $D_{пп}$ и скоростью изменения давления в барабане котла



Рис. 126. Регулирование подачи воздуха по схеме «топливо — воздух»:
1 — регулятор, *2* — задатчик ручного управления, *3* — регулирующий орган



Рис. 127. Регулирование подачи воздуха по схеме «теплота — воздух»:
1 — дифференциатор, *2* — задатчик ручного управления, *3* — регулирующий орган, *4* — регулятор подачи воздуха

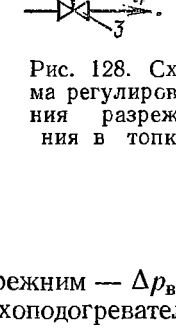


Рис. 128. Схема регулирования разрежения в топке

$p_б$. Второй сигнал на регулятор остается прежним — $\Delta p_{вп}$. Перепад давления $\Delta p_{вп}$ измеряют на воздухоподогревателе или по давлению воздуха в напорном патрубке вентилятора. Управляющий сигнал подается для воздействия на расход воздуха в топку котла. Эта схема значительно лучше, чем предыдущая, отрабатывает внутренние возмущения, вызываемые изменением расхода, калорийности, влажности топлива.

Система регулирования разрежения должна обеспечить его постоянство $S_т$ в верхней части топки барабанного котла, благодаря чему достигается устойчивость факела и создаются условия, препятствующие выбросам газов из-под обмуровки. Автоматическая схема регулирования разрежения (рис. 128) состоит из регулятора *1*, на который поступает сигнал $S_т$, определяющий количество отсасываемых дымовых газов. Сигнал может иметь пульсации, что ухуд-

ния ТЭС, поэтому рабочие средства измерений давления подвергают периодическим поверкам (1 раз в год) образцовыми грузопоршневыми манометрами. Если манометры работают в условиях повышенных температур, вибраций, магнитных полей, межповерочный период сокращается.

Правила подключения дифманометров к измеряемому объекту подробно рассматриваются в следующей главе.

Контрольные вопросы

1. Что такое избыточное, вакуумметрическое и абсолютное давления?
2. В чем преимущество однотрубных манометров по сравнению с U-образными манометрами?
3. Как преобразуется измеряемое давление в пружинных и мембранных приборах для измерения давления?
4. Почему распрямляется пружина манометра под действием давления?
5. Какие промежуточные преобразователи давления в унифицированный электрический сигнал применяют в первичных приборах?
6. Как сглаживают колебания стрелки манометра?
7. Почему импульсные линии при измерении давления газа прокладывают с уклоном?
8. Для чего используют разделительные сосуды в импульсных линиях при измерении давления?
9. Какие разделительные сосуды вы знаете?

ГЛАВА V

ПРИБОРЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ПАРА, ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ТЕПЛОТЫ

§ 30. Общие сведения

При определении мощности, производительности и кпд энергетических установок на ТЭС, контроле и управлении производственными процессами требуется точное и надежное измерение расхода различных жидких и газообразных веществ в напорных линиях.

Прибор, измеряющий расход, т. е. количество вещества, проходящее в трубопроводах в единицу времени, называют *расходомером*. Если расходомер снабжен суммирующим устройством со счетчиком, он служит для одновременного измерения расхода и количества вещества и называется *счетчиком количества*. Показания счетчика выражаются в единицах объема ($м^3$, л) или в единицах массы (кг, т). Соответственно различают измеряемый объемный ($м^3/ч$, $м^3/с$) и массовый расход вещества (кг/ч, кг/с, т/ч).

шает работу системы регулирования. Для их устранения (сглаживания сигнала) устанавливают специальные устройства — демпферы. Управляющие воздействия поступают на регулирующие органы *3* дымососов. При этом производительность дымососов можно регулировать поворотными многоосными дроссельными заслонками, направляющими аппаратами или изменением частоты вращения рабочих колес дымососов (с помощью гидромуфт). С помощью задатчика ручного управления *2* устанавливают требуемое значение регулируемой величины.

Для барабанных котлов в установившемся режиме должно поддерживаться равенство между расходом питательной воды и количеством вырабатываемого пара. Уровень воды в барабане $H_б$ является показателем этого соответствия. Кроме того, надежность и безопасность работы котла и турбины зависят от поддержания заданного уровня в барабане.

При уменьшении уровня ниже верхнего допустимого предела проточная часть турбины заносится солями и в нее попадает влага, нарушается питание водой подъемных труб, ухудшается прочность стыковочных соединений и возникает тяжелая авария — пережог труб. Для надежного питания котлов водой допустимые значения отклонений уровня не должны превышать 100 мм вод. ст. Барабан снабжается по нескольким трубопроводам, на которых устанавливается одинаковое количество запорной и регулирующей арматуры.

На колебания уровня воды в барабане $H_б$ влияет величина и скорость изменения тепловой нагрузки, расход пара на турбину и количество и скорость подачи питательной воды в барабан.

Изменение уровня воды $H_б$ в барабане котла зависит от расхода питательной воды и пара, а также от конструктивных характеристик барабана: $F(\rho_в - \rho_п)dH_б/dt = D_{пв} - D_{пп}$, где F — площадь зеркала испарений в барабане; $\rho_в$, $\rho_п$ — плотность воды и пара в циркуляционном контуре; $D_{пв}$ и $D_{пп}$ — расход воды и пара.

Кроме того, при возмущении по расходу пара уровень воды в барабане изменяется по горбообразной кривой (рис. 129). Это объясняется тем, что в первый момент после увеличения расхода пара резко уменьшается давление в барабане и возрастает уровень. Затем уровень снижается и его изменение подчиняется уравнению материального баланса, приведенному выше. Таким образом, барабан как объект регулирования не обладает свойством самовыравни-

Массовый расход дает более полные сведения о количестве вещества, так как объем газов зависит от температуры и давления. Поэтому для получения сопоставимых результатов объемные расходы газов приводят к нормальным условиям ($t°=20°C$; $p=0{,}1$ МПа, $\varphi=0$) и обозначают $G_{н,о}$ (нм³/ч; нм³/с).

Применяют различные методы измерения расхода вещества и конструкции расходомеров и счетчиков. Наиболее распространены следующие расходомеры: переменного перепада давления с сужающими устройствами, постоянного перепада давления, тахометрические, электромагнитные, ультразвуковые.

§ 31. Измерение расхода по перепаду давления на сужающем устройстве

Среди приборов, измеряющих расход вещества, чаще всего применяют расходомеры, определяющие перепад давления на неподвижном сужающем устройстве, которое устанавливают в трубопроводах диаметром от 50 до 1600 мм.



Рис. 49. Сужающие устройства:
а — диафрагма, *б* — сопло, *в* — сопло Вентури

К сужающим устройствам, применяемым на ТЭС, относят диафрагмы, сопла и сопла Вентури (рис. 49). Эти устройства используют в комплекте с дифференциальными манометрами для измерения расхода и количества жидкостей, газов и паров в горизонтальных, наклонных и вертикальных трубопроводах без индивидуальной градуировки.

Диафрагма (рис. 49, *а*) представляет собой тонкий диск с центральным отверстием, передняя часть которого имеет цилиндрическую форму, переходящую в расширяющийся конус. Отбор давления осуществляется с помощью

кольцевых камер, расположенных по окружности трубы, или с помощью отдельных отверстий в трубопроводе (бескамерный отбор). Диафрагмы широко применяют на ТЭС для измерения расходов жидкости, пара или влажного газа.

Сопло (рис. 49, *б*) имеет спрофилированную входную часть, которая переходит в цилиндрический участок диаметром d. Отбор давления осуществляется так же, как и в диафрагме. Сопла используют для измерения расхода паров и газов, причем они позволяют измерять больший расход, чем диафрагма. Потери давления и ошибки измерения у сопла ниже, чем у диафрагмы.

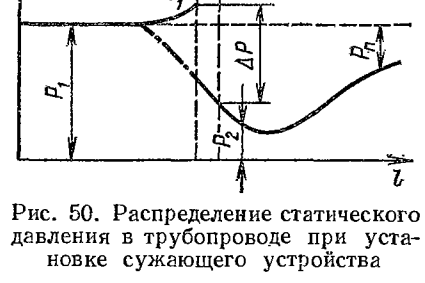


Рис. 50. Распределение статического давления в трубопроводе при установке сужающего устройства

Сопло Вентури (рис. 49, *в*) применяют там, где при измерении расхода недопустимы большие потери давления. Оно состоит из двух частей: стандартного сопла и диффузора. Отбор давления от сопла осуществляется через кольцевые камеры.

Зависимость измеряемого статического давления среды от длины l трубопровода при установке в нем сужающего устройства показана на рис. 50. На основании закона сохранения энергии и неразрывности потока можно получить выражения для расхода сжимаемой среды (газ, пар): $G_м = \varepsilon\alpha S\sqrt{2\rho(p_1-p_2)}$; $G_0 = \varepsilon\alpha S\sqrt{2/\rho(p_1-p_2)}$, где $G_м$ и G_0 — массовый и объемный расход; ε — поправочный множитель на расширение измеряемой (сжимаемой) среды (например, для воды он равен 1), определяемый экспериментально при градуировке прибора; S — площадь отверстия сужающего устройства; α — безразмерный коэффициент расхода, определяемый экспериментальным путем; ρ — плотность измеряемой среды; p_1 и p_2 — измеряемые давления.

Если коэффициент α и множитель ε не зависят от измеряемого расхода, выражения записывают так: $G_м = K_м\sqrt{\Delta P}$; $G_0 = K_0\sqrt{\Delta P}$, где $K_м$, K_0 — постоянные коэффициенты.

При расчете градуировочной характеристики расходомера значение $\alpha_и$ в зависимости от отношения диаметров d/D и комплекса $G_м/(D\mu)$ (μ — динамическая вязкость сре-

вания. Рассмотренные особенности налагают дополнительные требования к регулированию уровня воды в барабанах котлов, т. е. к регулированию питания.

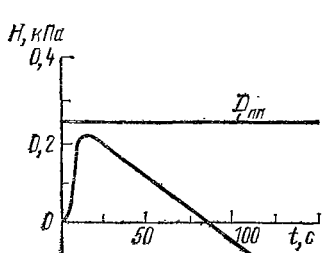


Рис. 129. Переходная характеристика котла ТП-87 по уровню при возмущении расходом пара

Основным вариантом автоматической системы регулирования питания барабанных котлов водой принята трехимпульсная схема (рис. 130). Формирующими сигналами для регулятора питания *1* являются: уровень воды в барабане $H_б$, расход питательной воды $D_{пв}$, расход пара $D_{пп}$. Регулятор питания стабилизирует заданный уровень в барабане в стационарных режимах по сигналу $H_б$. Однако при возмущениях по расходу пара или питательной воды сигнал по уровню не обеспечивает быстрой компенсации отклонений, поэтому практически регулятор питания должен снимать нарушения режима еще до изменения уровня, т. е. служить регулятором соотношения между паром и пита-

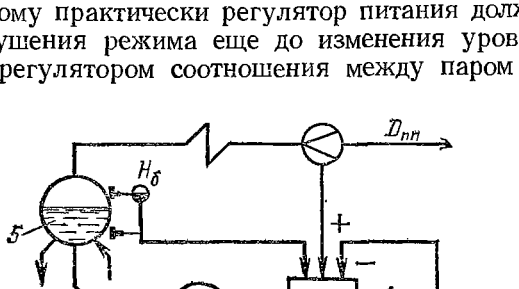


Рис. 130. Трехимпульсная АСР питания водой барабанного котла:

1 — регулятор питания, *2* — регулирующий клапан питательной воды, *3* — задатчик ручного управления, *4* — водяной экономайзер, *5* — барабан

тельной водой. При наличии сигналов $D_{пв}$ и $D_{пп}$ регулятор питания начинает работать еще до того, как появится отклонение уровня, т. е. сразу за появлением возмущений по питательной воде или расходу пара.

Регулятор настраивается так, что одинаковое изменение расхода пара и питательной воды вызывает перемещение регулирующего клапана в разные стороны. В установившемся состоянии регулятор поддерживает уровень независимо от нагрузки котла, реализуя ПИ-закон регулирования. Средний уровень устанавливают с помощью задатчика ручного управления *3*.

При работе паровых котлов важным параметром является также температура перегретого пара. Поддержание ее в заданных пределах обеспечивает экономичную работу тепловой установки, повышает надежность и долговечность работы турбины. При резком снижении температуры перегрева пара $p_{пп}$ возрастает его влажность, при повышении температуры возникают недопустимые тепловые расширения, поэтому отклонения температуры пара от номинальных значений не должны превышать $\pm 1\%$ в стационарных режимах. Диапазон нагрузок для каждого котла определяется его конструктивными особенностями. Следует отметить, что температура перегрева пара зависит от распределения теплоты между парогенерирующими и перегревательными поверхностями котла, от шлакования и загрязнения поверхностей нагрева, изменения температуры питательной воды, избытка воздуха, влажности топлива и т. д. Эти факторы влияют на статические характеристики пароперегревателей.

На динамические свойства оборудования (зависимость температуры пара от времени) при нанесении возмущения наибольшее влияние оказывают изменения температуры или влажности пара на входе в котел, температурного режима котла и расхода пара через котел. Особенностью динамических характеристик пароперегревателей является запаздывание изменения температуры пара на выходе из них после возмущения, что связано с большой площадью и значительной длиной труб пароперегревателей. В процессе эксплуатации эти особенности учитываются при построении схем АСР и выборе способов регулирования. Обычно участком регулирования температуры перегрева пара является часть поверхности пароперегревателя от места ввода охлаждающего агента до выходного коллектора, в котором поддерживается заданная температура.

В современных котлах наиболее распространен способ регулирования с помощью впрыскивающих пароохладителей, через которые в паропровод поступает охлаждающий агент — собственный конденсат котла или химически очищенная вода.

ды) берется из нормативных документов. Выбранный идеальный коэффициент $\alpha_и$ не учитывает реальных условий работы сужающего устройства — шероховатость трубопровода и износ острой входной кромки у диафрагм. Реальный коэффициент α определяется умножением коэффициента $\alpha_и$ на соответствующие коэффициенты шероховатости $K_ш$ и износа кромки $K_{ин}$. При измерении расходов вязких жидкостей в трубопроводах с малым диаметром необходимо вводить в показания расходомеров дополнительную поправку либо проводить их индивидуальную градуировку.

Поправочный множитель ε на расширение среды при прохождении сужающего устройства зависит от отношения $(p_1 - p_2)/p_1$ и свойств среды. Чем больше это отношение, тем больше поправочный множитель ε отличается от единицы. При одинаковом отношении $\Delta p/p_1$ поправочный множитель ε для диафрагм больше, чем для стандартных сопл. При изменении расхода отношение $\Delta p/p_1$ меняется, поэтому градуировочную зависимость определяют, ориентируясь на поправочный множитель $\varepsilon_{ср}$, соответствующий среднему расходу сжимаемой среды $G_{м,\,ср}$. Отклонение действительного от среднего расхода вызывает погрешность, которая снижается с уменьшением отношения $\Delta p/p_1$.

Другим параметром, влияющим на измеряемый расход, является плотность среды до сужающего устройства, которую определяют из таблиц в зависимости от температуры и давления среды, измеряемых в трубопроводе перед этим устройством. Необходимы также поправки на увеличение диаметров трубопроводов и проходного сечения сужающего устройства из-за повышенной температуры измеряемой среды.

Расчет и выбор сужающих устройств производят на основе заданной измеряемой среды и условий измерения, т. е. температуры среды t_c°, диаметра трубопровода D, среднего $G_{ср}$ и максимального G_{max} расхода, номинального давления p_1 и потери давления $p_п$ на сужающем устройстве.

В результате расчета, выполняемого методом последовательных приближений, определяют тип сужающего устройства и его параметры. Затем по выбранному значению измеряемой разности давлений Δp подбирают тип дифманометра с соответствующим пределом измерения разности давлений (табл. 9).

Зависимость между перепадом давлений в сужающем устройстве и расходом среды позволяет градуировать эти приборы в единицах расхода. Для получения линейной шкалы расходомеров в электрическую или кинематическую схе-

На рис. 131 показана схема регулирования температуры перегретого пара, которая, являясь двухимпульсной, поддерживает ПИ-закон регулирования, что обеспечивает поддержание температуры перегрева без остаточной неравномерности. Основным сигналом для регулятора *9* служит отклонение температуры пара на выходе котла $t_{пп}$. Дополнительным корректирующим принят сигнал по скорости изменения температуры в промежуточной точке $t_{пр}$, непосредственно за впрыскивающим пароохладителем. Этот

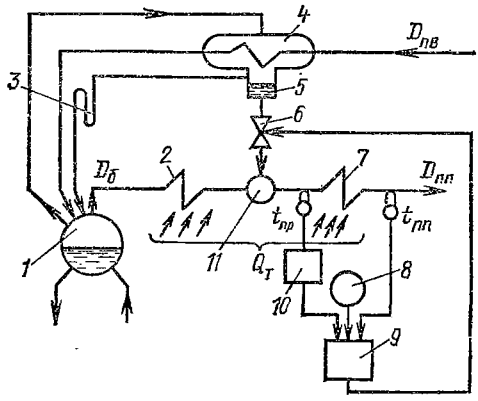


Рис. 131. Схема регулирования температуры перегрева первичного пара:

1 — барабан, *2*, *7* — ступени пароперегревателя, *3* — гидрозатвор, *4* — охладитель пара, *5* — сборник конденсата, *6* — клапан впрыска, *8* — задатчик ручного управления, *9* — регулятор, *10* — дифференциатор, *11* — пароохладитель. Стрелками обозначен тепловой поток $Q_т$

сигнал является упреждающим, так как регистрирует изменение температуры пара до того, как оно появится на выходе котла. Управляющее воздействие, вырабатываемое регулятором, действует на регулирующий клапан впрыска *6*, понижая температуру пара за счет теплоты, отбираемой на испарение охлаждающей воды, впрыскиваемой в паропровод.

Для мощных котлов с развитой поверхностью перегрева применяют многоступенчатое регулирование, т. е. по ходу пара устанавливают два или три впрыска, при этом каждый впрыск действует по автономной двухимпульсной схеме.

Таблица 9. **Рабочие дифманометры**

Наименование	Тип	Сумма абсолютных значений пределов, или верхний предел измерений, кПа	Класс точности
Показывающие или самопишущие приборы прямого действия:			
жидкостные (ртуть, масло МВП)	ДТ	2,5; 7	1
сильфонные	ДП	От 0,63 до 100	1; 1,6
	ДСС (П)	0	1; 1,5
	ДСКС (П)	От 6,3 до 160	4
Бесшкальные приборы со встроенными дифференциально-трансформаторными преобразователями:			
мембранные	ДМИ	От 0,63 до 100	1,5
	ДМ	От 1,6 до 630	1; 1,5
колокольные	ДКО	От 0,1 до 1	1,5
Бесшкальные приборы со встроенными ферродинамическими преобразователями:			
колокольные	ДКОФМ	От 0,04 до 0,4	2
мембранные	ДМК	От 1 до 16	1,5
Бесшкальные приборы со встроенными преобразователями с компенсацией магнитных потоков:			
сильфонные	ДСЭН	От 1 до 4	1
	ДСЭТ	От —1 до —4	
	ДСЭТН	0,4	
	ДСЭР	От 1 до 4	1,5
мембранные	ДМЭ	От 1,6 до 630	1
	ДМЭР	От 4 до 630	1,5
Бесшкальные приборы со встроенными преобразователями с силовой компенсацией:			
сильфонные	ДС-Э	От 4 до 25	1; 1,5
	ДС-ЭР	От 6,3 до 630	1,5; 2,5
мембранные	ДМ-Э	От 0,16 до 6	1; 1,5
	ДМ-ЭР		1,5; 2,5
«Сапфир-22»	ДД	От 0,16 до 16000	0,5

Примечание. Дифманометры имеют следующий стандартный ряд пределов измерений (1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630) кПа.

му приборов включают устройства, осуществляющие операцию извлечения квадратного корня из измеряемой разности давлений. Это затрудняет обслуживание расходомеров и является их существенным недостатком. Другой недостаток таких расходомеров — суженный диапазон измерения расхода среды (30—100% максимального значения измеряемой величины).

Часто на практике приходится определять расход загрязненных, неоднородных жидкостей или газов, для чего применяют нестандартные сужающие устройства — сегментные диафрагмы, в которых имеется отверстие, выпол-

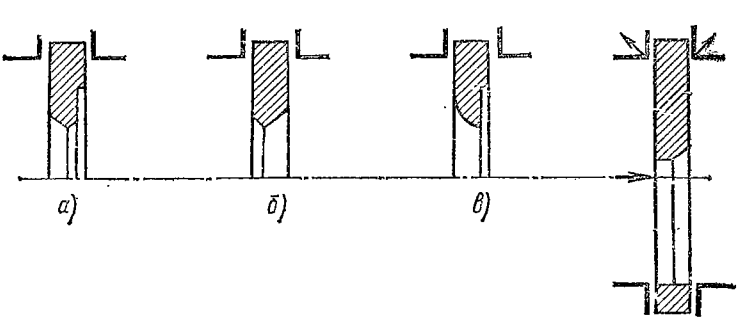


Рис. 51. Профили нестандартных сужающих устройств для измерения малых расходов жидкостей (*а* — при $m=0{,}1 \div 0{,}2$, *б* — при $m=0{,}06 \div 0{,}12$, *в* — при $m=0{,}25 \div 0{,}36$) и сегментная диафрагма (*г*)

ненное в виде сегмента окружности. При измерении неоднородных жидкостей оно располагается в нижней части, а при измерении неоднородных газов — в верхней части трубопроводов.

При измерении расхода вязких жидкостей используют нестандартные сужающие устройства с постоянным коэффициентом α. Различные профили этих устройств и их зависимость от значения $m=d/D$ показаны на рис. 51, *а*, *б*, *в*. Для измерения расхода мазута на ТЭС применяют сужающее устройство с профилем «четверть круга» (рис. 51, *в*). Расход загрязненных жидкостей или газов измеряют с помощью сегментной диафрагмы со смещенным отверстием (рис. 51, *г*).

§ 79. Схемы автоматического регулирования прямоточных котлов

Конструктивные особенности прямоточных паровых котлов (отсутствие барабана, более развитые поверхности нагрева, более высокие гидравлические сопротивления), определяющие динамические характеристики участков регулирования, должны учитываться при построении систем регулирования котла. Кроме того, усложняется регулирование отдельных параметров, так как учитывается взаимная связь между системами горения, парообразования, температуры перегрева пара и т. д. Например, усложняется система регулирования $t_{\text{пп}}$, поскольку расход питательной воды значительно заметнее, чем в барабанных котлах. Расходы на впрыски в барабанных котлах обычно находятся на уровне 5% номинальной производительности, а в прямоточных котлах возрастают вдвое. Однако и в прямоточных котлах можно выделить автономные системы регулирования давления перегретого пара и тепловой нагрузки, экономичности процесса горения и регулирования температуры перегрева пара. Рассмотрим схемы этих систем регулирования.

Регулирование давления перегретого пара и тепловой нагрузки в прямоточных котлах должно обеспечить их оптимальный тепловой режим и заданное давление перегретого пара. При этом в зависимости от тепловой схемы и режимов работы оборудования используют два варианта построения схем тепловой нагрузки и температурного режима.

Для первого варианта регулятор питания выполняет функции регулятора тепловой нагрузки, а регулятор топлива поддерживает тепловой режим. Для второго варианта регулятор топлива служит регулятором тепловой нагрузки, а регулятор питания поддерживает температурный режим.

Независимо от формирующих сигналов температурный режим первичного тракта котла будет характеризоваться соотношением расхода питательной воды $D_{\text{пв}}$ и тепловыделением в топке, оцениваемым как сигнал по теплоте D_q. Тепловая нагрузка зависит также от расхода питательной воды $D_{\text{пв}}$ и расхода топлива $B_{\text{т}}$. Оба эти варианта показаны на рис. 132. Для первого варианта (рис. 132, *а*) регулятор питания *1* получает формирующий сигнал по расходу питательной воды $D_{\text{пв}}$ и задание по нагрузке, а регулятор топлива *5* — сигналы по расходу питательной воды $D_{\text{пв}}$ и сигнал по промежуточной теплоте. Сигнал по промежуточной теп-

лоте состоит из трех составляющих: «видимого» значения расхода пара $D_{пр}$, давления пара $p_{пр}$ и изменения его скорости в промежуточной точке. Расход пара в промежуточной точке определяют по показаниям $D^{д}_{пр}$ паромера как действительное значение расхода с учетом поправок на плотность пара: $D_{пр}=D^{д}_{пр}K$, где K — коэффициент, учитывающий изменение плотности пара в промежуточной точке.

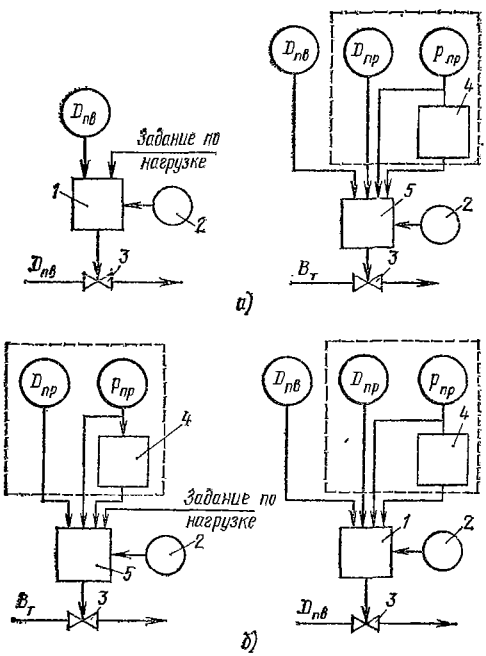


Рис. 132. Схемы регулирования тепловой нагрузки:

а — с ведущим регулятором питания, *б* — с ведущим регулятором топлива; *1*, *5* — регуляторы питания и топлива, *2* — задатчик, *3* — регулирующий орган, *4* — датчик

Для формирования сигнала по скорости используют сигнальное устройство — дифференциатор, через который пропускают сигнал $p_{пр}$ и заводят на регулятор. Управляющее воздействие регулятора топлива производится на регулирующие органы по топливу $B_т$.

Для второго варианта (рис. 132, *б*) сигнал по теплоте используют как для регулятора топлива *5*, так и для регулятора питания *1*. Для регулятора топлива вторым сигналом является задание по нагрузке, а для регулятора пита-

§ 32. Методика измерения расхода веществ с помощью сужающих устройств

Стандартные сужающие устройства в комплекте с дифманометрами применяют для измерения расхода веществ в трубопроводах круглого сечения с $0{,}05<m<0{,}64$. В других трубопроводах осуществляют индивидуальную градуировку расходомеров. При установке сужающих устройств соблюдают ряд требований:

фазовое состояние вещества при прохождении через сужающее устройство не должно меняться (жидкость не испаряется, пар не конденсируется; газы, растворенные в жидкости, не выделяются);

участки трубопровода до и после сужающего устройства должны быть прямыми без запорной арматуры, чтобы конденсат или пыль, выделяющаяся из пара либо газа, а также осадок или воздух, выделяющийся из жидкости, не скапливались в трубопроводе;

при измерении расхода агрессивных жидкостей, газов, а также нефтепродуктов дифманометры надо устанавливать со специальными разделительными сосудами;

если при измерении расхода параметры среды отличаются от расчетных, в показания прибора вводят поправки;

длина импульсных линий от сужающих устройств к дифманометрам не должна превышать 15 м, а их внутренний диаметр должен быть не менее 8 мм;

импульсные линии прокладывают вертикально или с уклоном 1 : 10, при этом должны быть плавными изгибы труб и обеспечиваться герметичность линий и арматуры, а также их теплоизоляция;

на импульсных линиях вблизи дифманометра устанавливают вентили для продувки линий;

дифманометры устанавливают по отвесу на твердом основании в местах, где нет тряски и вибрации, а вторичные приборы — на блочных щитах управления.

Рассмотрим схемы соединительных (импульсных) линий при измерении расхода жидкости, газа, пара.

При измерении расхода жидкости дифманометр рекомендуется устанавливать ниже сужающего устройства *3* (рис. 52, *а*). Соединительные линии подсоединяют в пределах углов ψ. При установке дифманометра *1* выше сужающего устройства (рис. 52, *б*) во всех наивысших точках линий устанавливают газосборники *5* с продувочными вентилями. Если измеряемая жидкость имеет высокую

ния, поддерживающего температурный режим,— расход питательной воды $D_{пв}$.

При сравнении рассмотренных вариантов и выборе одного из них следует учитывать как конструктивные особенности установки, так и условия работы котла. В первом варианте регулятор топлива не оказывает существенного влияния на регулирование питания. Регулятор питания хорошо отрабатывает возмущения по нагрузке. В то же время для регулятора топлива *5*, поддерживающего температурный режим, необходим достаточный диапазон регулирования.

Для второго варианта взаимовлияние контуров между регуляторами топлива и питания проявляется сильнее, чем для первого варианта, что связано с изменением сигнала по теплоте как под влиянием расхода топлива $B_т$, так и питательной воды $D_{пв}$. Однако внутрипоточные возмущения во втором варианте отрабатываются лучше. Сравнивая варианты схем по сложности, можно сделать вывод, что более сложным является второй вариант, так как в схеме используется больше аппаратуры, следовательно, возрастает стоимость проекта и усложняется наладка схем и их эксплуатация.

Возможны и другие варианты построения схем, например схема регулирования температурного режима, в которой на регулятор топлива поступает сигнал его расхода $B_т$. Однако, хорошо отрабатывая внутрипоточные возмущения, схема может применяться лишь для газомазутных котлов. Схемы, показанные на рис. 132, более универсальны и не зависят от вида топлива.

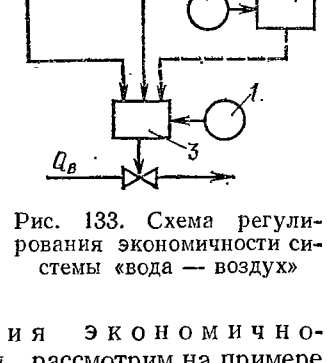


Рис. 133. Схема регулирования экономичности системы «вода — воздух»

Систему регулирования экономичности процесса горения рассмотрим на примере схемы «вода — воздух» (рис. 133). Формирующим сигналом для регулятора экономичности процесса горения *3* являются два сигнала: по расходу питательной воды $D_{пв}$ и расходу воздуха $Q_в$. Регулирующее воздействие осуществляется на регулирующие органы подачи воздуха (дутьевые вентиляторы, направляющие аппараты). Задатчиком *1* устанавливается необходимый уровень расхода воздуха. Так же как

температуру ($t° > 120$ °С), для обеспечения равенства плотностей жидкости в обеих соединительных линиях устанавливают уравнительные сосуды *4*. Трубы до сосудов покрывают тепловой изоляцией.

При измерении расхода пара также необходимо использовать уравнительные сосуды, которые обеспечивают постоянство и одинаковую высоту уровней конденсата в обеих линиях. Трубы до сосудов покрывают тепловой изоляцией. Для удаления воздуха из линий дифманометры

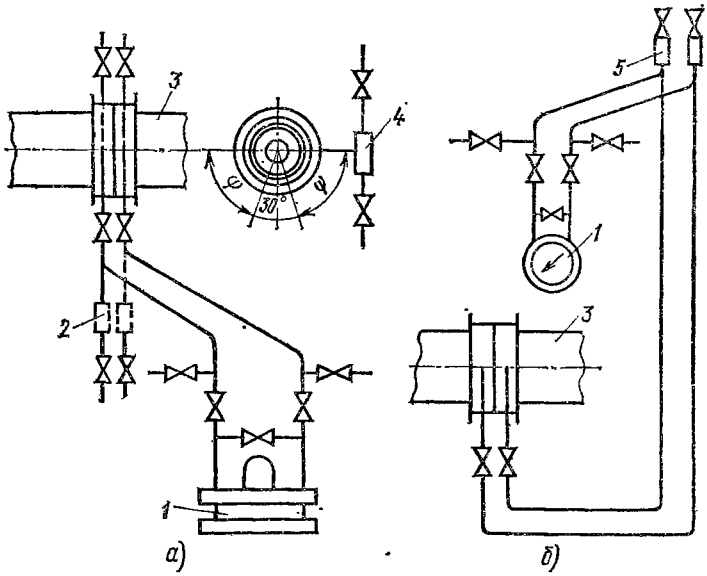


Рис. 52. Схемы подсоединений импульсных линий к трубопроводу при измерении расхода жидкости:
а — при установке дифманометра ниже сужающего устройства, *б* — при установке дифманометра выше сужающего устройства

рекомендуется устанавливать ниже сужающего устройства, в противном случае ставят газосборники.

При измерении расхода газа дифманометры располагают выше сужающего устройства, чтобы влага, выделяющаяся из газа, стекала в трубопровод. Если это не удается, в низких точках линий размещают сборники влаги с вентилями продувки *2*. Кроме того, при измерении расхода горячих газов необходимо обеспечить одинаковую температуру в обеих линиях.

и в барабанных котлах необходимое количество топлива и воздуха дает оптимальный режим горения. Для регулирования подачи топлива используют схему «вода — воздух». Соотношение «топливо — воздух» может нарушаться как при внутренних, так и при внешних возмущениях.

Для обеспечения более точного регулирования в схему, показанную на рис. 133, вводится дополнительный корректирующий сигнал по O_2 (содержание свободного кислорода

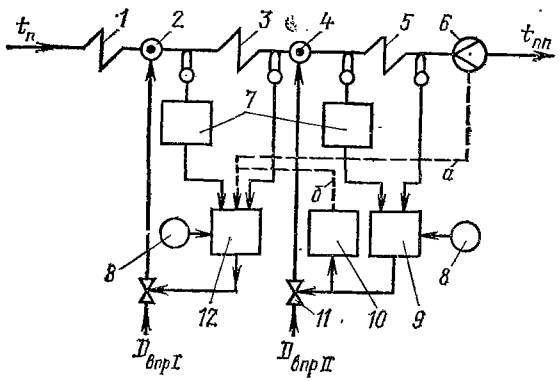


Рис. 134. Схема регулирования температуры первичного пара:

1, 3, 5 — ступени пароперегревателя, *2, 4* — впрыскивающие пароохладители, *6* — сужающее устройство, *7* — дифференциатор, *8* — задатчик ручного управления, *9* — регулятор температуры перегрева первичного пара на выходе котла, *10* — вспомогательный корректирующий регулятор, *11* — регулирующий клапан, *12* — предвключенный регулятор температуры перегрева пара

в топочных газах), который, являясь исчезающим, подается на регулятор через дифференциатор *2*. Разрежение в верхней части топки в прямоточных котлах регулируется так же, как и в барабанных.

Схема регулирования температуры первичного пара $t_{пп}$ показана на рис. 134, где тракт перегрева разбит на два участка, каждый из которых имеет собственную систему регулирования. Разбиение на участки перегрева пара улучшает качество регулирования, поэтому каждый из участков проектируют и изготовляют как самостоятельное изделие. Температура перегрева пара регулируется по двухимпульсной схеме. Первым сигналом для регулятора каждого перегревательного участка является температура пара на его выходе, а вторым — сигнал по скорости изменения температуры пара за впрыском. Второй сигнал вводится в регулятор через дифференциатор *7*, что

Соединительные линии не рекомендуется прокладывать вблизи горячих трубопроводов и печей, в противном случае их покрывают изоляцией.

Основными достоинствами расходомеров с сужающими устройствами являются: широкая область давлений, температур и расходов, в которой их можно использовать при измерении однофазных веществ, определение градуировочной характеристики расчетным путем; взаимозаменяемость дифманометров и вторичных приборов. Недостатки — нелинейная зависимость расхода от разности давлений, что вызывает большие погрешности в измерении малых расходов; инерционность показаний прибора из-за наличия соединительных линий; необходимость проведения индивидуальной градуировки расходомеров при измерении расхода вязких сред или в трубах малого диаметра; нарушение целостности трубопроводов при установке в них сужающих устройств.

Для определения общего количества вещества по измеренному мгновенному расходу используют частотные интеграторы И4, которые работают совместно с расходомерами, имеющими частотный преобразователь В4 с сигналом от 4 до 8 кГц. Входной сигнал И4 преобразуется в последовательность импульсов, которые поступают на вход асинхронного двигателя, работающего в шаговом режиме. Двигатель перемещает указатель сумматора по шкале. Интегрирование занимает от 3 мин до 125 ч. В приборе предусмотрен сброс показаний. Другие счетчики — частотные сумматоры СЧ и счетчики импульсов СИ — имеют такой же принцип действия, но результат выдают в цифровой форме.

§ 33. Расходомеры постоянного перепада давления

Рассмотренные ранее расходомеры переменного перепада давления широко распространены на ТЭС. Однако в ряде случаев этот вид расходомеров не может быть использован. В частности, для измерения небольших объемных расходов жидкостей (до 16 м³/ч) и газов (до 40 м³/ч) в вертикальных трубопроводах (диаметром от 4 до 100 мм) применяют расходомеры постоянного перепада давления — *ротаметры*.

Принцип действия ротаметров (рис. 53) основан на обтекании измеряемым потоком вещества чувствительного элемента так, что перепад давления на нем сохраняется посто-

позволяет учитывать колебания температуры пара сразу же после возмущения, не дожидаясь изменения температуры $t_{пп}$. Задание регулятору устанавливается задатчиком ручного управления *8*. Иногда для учета колебаний нагрузки вводят дополнительные сигналы по заданию, например по расходу перегретого пара (линия *а*) или по положению регулирующего органа, следующего по ходу впрыска (линия *б*). Таким образом корректирующим регулятором формируется сигнал по заданию на регулятор *12*, с выхода которого поступает управляющий сигнал на открытие регулирующего клапана *11* первого впрыска.

Для повышения кпд котла и всей паротурбинной установки на современных блоках используют вторичный перегрев пара. Часть пара, отработавшая в цилиндрах высокого давления, отбирается на перегрев, т. е. возвращается в котел и доводится до требуемой температуры. Вторичный перегрев можно выполнять с помощью теплообменников, где греющей средой служит первичный пар или топочные газы. Для регулирования температуры вторичного пара впрыски не используют, так как это неэкономично.

§ 80. Регулирование вспомогательных установок

Вспомогательное оборудование и установки ТЭС обеспечивают работу основного технологического цикла. Вспомогательные установки также требуют надежных систем регулирования. Рассмотрим типовые решения схем регулирования вспомогательных процессов и установок парового котла.

На рис. 135 показана схема регулирования *быстроходной молотковой мельницы*. При камерном способе сжигания твердого топлива применяют пылесистемы с непосредственным вдуванием пыли в топку. Топливо от ленточного пылепитателя *4* поступает в молотковую мельницу *5*, где размалывается и, смешиваясь с вдуваемым в мельницу воздухом $Q_м$, направляется в топку котла.

Из этой схемы видно, что производительность мельницы непосредственно влияет на расход топлива, поступающего в топку котла. Таким образом, загрузка молотковой мельницы влияет на его нагрузку. Если учесть, что оптимальное сгорание топлива зависит от размеров частиц угля, попадающих в топку, то и качество работы быстроходной молотковой мельницы влияет на режим горения.

Стабилизация помола топлива осуществляется регулятором расхода первичного воздуха $Q_м$. Формирующим сиг-

янным. Это обеспечивается установкой на вертикальных участках трубопроводов с восходящим потоком однородного вещества конусных трубок с чувствительным элементом в них (поплавок или поршень). С изменением измеряемого расхода чувствительный элемент перемещается вверх или вниз, при этом меняется проходное сечение отверстия для потока вещества. Если пренебречь силами трения и динамического напора, можно записать условие равновесия чувствительного элемента $(p_1 - p_2)\, S = m$, где p_1 — давление вещества в сечении $A - A$; p_2 — давление вещества в сечении $B - B$, которое меньше, чем p_1, из-за ускорения потока в кольцевом сечении между чувствительным элементом и стенкой трубки; S и m — поперечное сечение и масса чувствительного элемента. Таким образом, перепад давления на чувствительном элементе является постоянным и не зависит от расхода среды.

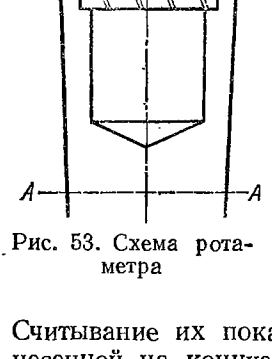


Рис. 53. Схема ротаметра

Положение чувствительного элемента зависит также от плотности измеряемого вещества, поэтому ротаметры разделяют на две группы: для жидкостей (градуируются по расходу воды); для газов (градуируются по расходу воздуха).

В зависимости от устройства различают стеклянные и металлические ротаметры. Стеклянные ротаметры являются показывающими и рассчитаны на давление до 0,6 МПа. Считывание их показаний осуществляется по шкале, нанесенной на коническую стеклянную трубку. Указателем шкалы служит верхняя кромка поплавка. Металлические ротаметры применяют для измерения расхода сред давлением более 6,4 МПа. Коническая трубка у них металлическая. Передача показаний у этих ротаметров осуществляется дистанционно либо с помощью дифференциально-трансформаторных, либо пневматических преобразователей. Выпускаются ротаметры классов точности 1,5; 2,5. Точность показаний может быть повышена в 2—3 раза в результате индивидуальной градуировки.

Недостатками ротаметров являются необходимость их установки на вертикальных трубопроводах, непригодность для измерения расхода сред с высокими давлением и температурой, необходимость разрыва трубопровода для установки конической трубки.

налом для регулятора расхода первичного воздуха *8* служит перепад давления воздуха на воздухопроводе в мельницу *5*. Заданием для регулятора *8* является сигнал от котельного регулятора мощности (КРМ) по нагрузке. Регулирующие заслонки *6* на подводе регулируют необходимое количество воздуха, вдуваемого в мельницу.

Для регулирования загрузки используют регулятор загрузки мельницы *1*, на который подается сигнал от КРМ (сигнал по нагрузке). Управляющее воздействие регулятора *1* поступает на электропривод *3* питателей сырого угля *4*,

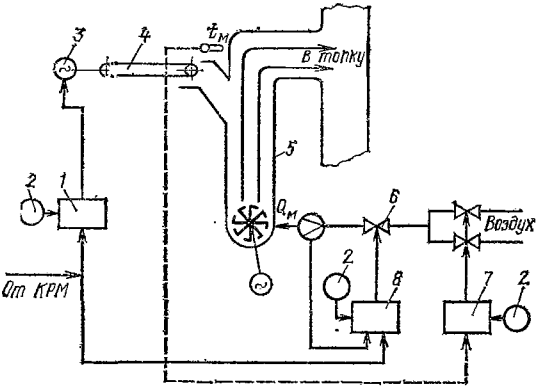


Рис. 135. Схема регулирования быстроходной молотковой мельницы:

1 — регулятор загрузки мельницы, *2* — задатчик ручного управления, *3* — электропривод, *4* — питатель сырого угля, *5* — мельница, *6* — регулирующие заслонки, *7* — регулятор температуры аэросмеси за мельницей, *8* — регулятор расхода первичного воздуха

который, изменяя частоту вращения питателей, регулирует подачу топлива в мельницу.

На молотковых мельницах может устанавливаться и регулятор *7* температуры аэросмеси за мельницей. Регулирование температуры аэросмеси за мельницей $t_м$ косвенно стабилизирует ее влажность, которая должна поддерживаться в заданных пределах. Высокая влажность смеси ухудшает условия нормального сжигания топлива, чрезмерная подсушка может привести к излишней текучести пыли, кроме того, она может стать взрывоопасной. На регулятор *7* поступает сигнал по температуре аэросмеси. При этом осуществляется управляющее воздействие на заслонки, изменяющие соотношение между горячим и слабо подогретым воздухом. Производительность мельницы *5* зависит от режи-

§ 34. Тахометрические расходомеры

Принцип действия тахометрических расходомеров основан на измерении средней скорости потока $V_{ср}$, которая пропорциональна объемному расходу вещества $G_0=SV_{ср}$, где S — площадь поперечного сечения трубопровода. В таких расходомерах рабочее тело под действием потока вращается, при этом его угловая скорость вращения пропорциональна скорости потока вещества, а следовательно, и объемному расходу.

В зависимости от конструкции чувствительного элемента тахометрические расходомеры бывают турбинные и шариковые.

Турбинные расходомеры (рис. 54, *а*) применяют для измерения расхода жидкостей, в частности мазута. В корпусе *5* расходомера установлены струевыпрямители *2* и *4*, расположенные на одной оси с аксиальной или тангенциальной турбиной *3*. У аксиальной турбины ось совпадает с потоком, а у тангенциальной — перпендикулярна ему. На внешней стороне корпуса размещают дифференциально-трансформаторный преобразователь *1*. В качестве турбинного служит расходомер топочного мазута ТМ-1, используемый на ТЭС.

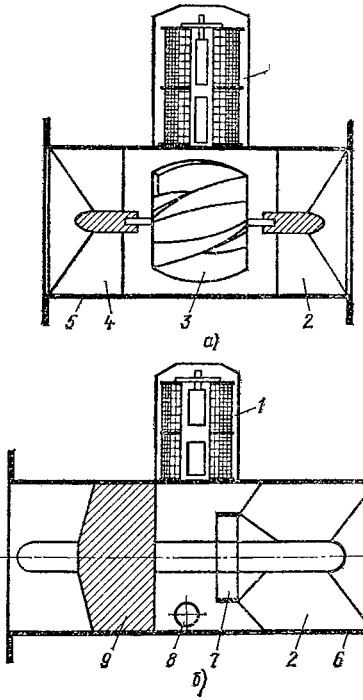


Рис. 54. Первичные преобразователи расхода жидкости: *а* — турбинный, *б* — шариковый

Турбинные расходомеры определяют расходы жидкостей в широком диапазоне, в трубопроводах диаметром от 4 до 750 мм при давлениях до 250 МПа и температурах от —240 до +700°С. Достоинствами турбинных расходомеров являются малая инерционность и высокая точность (погрешность 0,5%), а их недостатками — зависимость от расхода и вязкости среды, износ опор турбины.

ма работы питателей сырого угля, которые являются инерционными элементами. Для уменьшения инерции регулятор *1* через динамическое звено соединяют с регулятором *8* (на схеме не показано).

Другим типом объекта вспомогательного оборудования являются *деаэраторные установки* (деаэраторы) — смешивающие подогреватели питательной воды, в которых происходит удаление растворенного в воде кислорода. Схема регулирования деаэраторной установки показана на рис. 136. Деаэратор состоит из бака и деаэраторной голов-

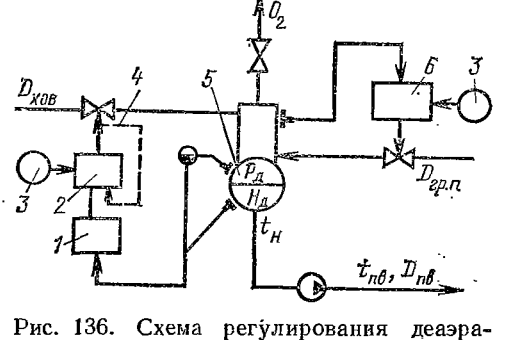


Рис. 136. Схема регулирования деаэраторной установки:

1 — дифманометр, *2*, *6* — регуляторы уровня и давления, *3* — задатчик ручного управления *4* — жесткая обратная связь, *5* — деаэратор

ки. В нижнюю часть деаэраторной головки подается греющий пар $D_{грп}$. Поток химически очищенной питательной воды $D_{хов}$ противотоком движется навстречу пару. Нагреваясь паром до кипения, питательная вода выделяет кислород, который излишками пара выбрасывается в атмосферу. Для поддержания оптимального режима работы деаэратора необходима стабилизация заданного давления $p_д$ в деаэраторной головке. Точность поддержания должна обеспечиваться в пределах 3—5 % номинального. Так как потери воды и конденсата неизбежны при работе тепловой станции, их восполняют через деаэратор, подавая химически очищенную питательную воду $D_{хов}$, которая, избавляясь от кислорода, поступает в парообразующие теплообменники. Косвенным показателем соответствия необходимого количества добавочной воды и деаэрированной смеси, состоящей из химически очищенной воды и конденсата, является уровень воды $H_д$ в аккумуляторных баках, который должен

Шариковые расходомеры (рис. 54, *б*) применяют для измерения расхода жидкостей с твердыми частицами и агрессивных, а также теплоносителя. В корпусе *6* преобразователя *1* располагается винтообразное струенаправляющее устройство *9*, которое закручивает поток жидкости, в результате чего начинает вращаться шарик *8*. Перемещение шарика в осевом направлении ограничивается кольцом *7*, за которым находится струевыпрямитель *2*. На внешней стороне корпуса имеется преобразователь *1* частоты вращения шарика в унифицированный электрический сигнал. Для небольших расходов используют шариковые расходомеры с тангенциальным подводом жидкости.

Шариковые расходомеры используют в трубопроводах диаметром от 10 до 600 мм. Их показания не зависят от вязкости $[(0{,}3 \div 12) \cdot 10^{-6}$ м²/с] и плотности (700—1400 кг/м³) вещества.

В качестве передающих преобразователей турбинных и шариковых расходомеров применяют магнитоэлектрические и дифференциально-трансформаторные. Магнитоэлектрические преобразователи создают значительный тормозной момент, поэтому их используют в трубопроводах диаметром более 200 мм, где возникают большие крутящие моменты. При меньших диаметрах применяют дифференциально-трансформаторные преобразователи, в которых лопасти турбины или шарик при вращении меняет ферромагнитную массу сердечника нижней катушки, вследствие чего на выходе возникает напряжение, модулированное по амплитуде сигналом, пропорциональным частоте вращения шарика или турбины. Далее этот сигнал усиливается и преобразуется в унифицированный сигнал постоянного тока.

§ 35. Скоростные и объемные счетчики количества жидкости

Тахометрические счетчики применяют для измерения количества протекающей жидкости (воды, бензина, мазута) с давлением до 1,6 МПа. Счетчики характеризуются следующими параметрами: диаметром входного патрубка; потерей давления, вызываемой прибором; нижним и верхним пределами измерения; порогом чувствительности; предельно допускаемым избыточным давлением и предельной температурой измеряемой жидкости.

По принципу действия выпускаемые тахометрические счетчики количества жидкости разделяют на скоростные и объемные.

поддерживаться в пределах ± 200 мм при переходных режимах.

Таким образом, деаэратор как объект регулирования должен иметь два регулятора: *2* (регулятор уровня) и *6* (регулятор давления).

Для регулятора *2* формирующим служит сигнал по уровню в деаэраторе $H_д$, который поступает от дифманометра *1*. Введение сигнала жесткой обратной связи *4* по положению регулирующего органа при подаче химически очищенной воды повышает устойчивость регулирования уровня. Для регулятора давления *6*, воздействующего на регулирующую заслонку на линии греющего пара, входным сигналом является давление пара, измеряемое в деаэраторной головке. Поддержание уровня и давления в деаэраторе должно происходить в жестких границах, поэтому в простых схемах используют ПИ-закон регулирования, который реализуется на промышленных электрических регуляторах.

Редукционно-охладительные установки (РОУ), которые широко используют на тепловых станциях для резервирования промышленных и теплофикационных отборов паровых турбин, связи между паропроводами высокого и среднего давлений, перепусков пара и т. д., служат для поддержания давления и температуры редуцированного пара, т. е. пара со сниженным давлением. Для снижения давления пар пропускают через клапан, а для снижения температуры пара впрыскивают воду в коллектор редуцированного пара, при этом температура должна поддерживаться в пределах $\pm 1{,}5\%$ номинальной, а давление редуцированного пара — не более $\pm 2\%$ номинального давления.

Схема регулирования РОУ (рис. 137) состоит из коллекторной трубы, регулирующих клапанов *3* и *6*, регулятора давления *7* и регулятора температуры *2*. Расход редуцированного пара $D_{рп}$ задается потребителем, и он является основным возмущающим воздействием для РОУ. Регулируемые величины $t_{рп}$ и $p_{рп}$ следует стабилизировать при изменении расхода пара $D_{рп}$.

Регулирование давления пара осуществляется регулятором *7*, который получает сигнал по давлению $p_{рп}$ и воздействует на регулирующий клапан *6*. Регулятор температуры *2*, для которого входным сигналом служит $t_{рп}$, оказывает регулирующее воздействие на клапан *3*. Этот клапан регулирует поток охлаждающей воды на впрыск в коллекторную трубу. Для увеличения быстродействия на регулятор температуры через динамическую связь *1* подается

Скоростные счетчики широко распространены в системах водоснабжения и тепловых сетях для учета отпускаемого потребителям количества холодной и горячей воды. На ТЭС их применяют в основном для измерения расхода технической воды.

В качестве чувствительных элементов в скоростных счетчиках применяют турбины (с аксиальным подводом вещества) или крыльчатки (с тангенциальным подводом вещества). Счетчики снабжены суммирующими устройствами, которые преобразуют угловую скорость чувствительного элемента в угол поворота стрелочного указателя. Основная погрешность скоростных счетчиков не превышает 2%.

Объемные счетчики широко применяют в химической и нефтеперерабатывающей отраслях промышленности, но из-за неприемлемых технических характеристик не используют на ТЭС.

Принцип их действия основан на отмеривании определенного объема проходящего через прибор вещества и суммировании результатов измерения. К объемным относят поршневые, с овальными шестернями и ротационные счетчики.

§ 36. Электромагнитные и ультразвуковые расходомеры

Рассмотренные ранее методы измерения расходов были связаны с установкой чувствительного элемента прибора в потоке измеряемой жидкости, в результате чего с течением времени происходит его износ, ухудшение точности, а также потеря давления в потоке. Существует ряд приборов для измерения объемного расхода жидкостей, чувствительный элемент которых не имеет непосредственного контакта с измеряемым веществом, что позволяет использовать их там, где работа других расходомеров невозможна (например, при измерении расхода агрессивных сред — кислот, щелочей, растворов и взвесей). К таким приборам относят электромагнитные и ультразвуковые расходомеры.

Электромагнитные расходомеры изготовляются классов точности 1 и 1,5 с постоянным и переменным магнитным полем. Первые расходомеры из-за эффекта поляризации у электродов применяют для определения расхода жидкометаллического теплоносителя, вторые — для определения расхода электропроводных растворов. Принцип их действия основан на возникновении эдс в проводнике, пропорциональной скорости его движе-

сигнал с выхода регулятора давления 7, при этом схема регулирования температуры работает как двухконтурная.

Для быстродействующих РОУ, работающих через устройство логического управления 5, в качестве формирующего сигнала используют давление пара $p_{рк}$ перед редукционным клапаном, при этом осуществляется воздействие на стопорные клапаны 4. Схема регулирования работает как защита от превышения давления.

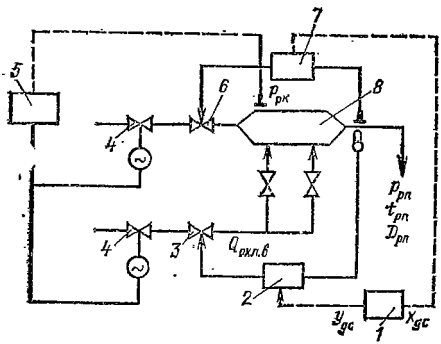


Рис. 137. Схема регулирования редукционно-охладительной установки (РОУ):
1 — динамическая связь, *2* — регулятор температуры, *3, 4, 6* — клапаны, *5* — устройство логического управления, *7* — регулятор давления, *8* — коллекторная труба

Контрольные вопросы

1. Каковы основные регулируемые параметры в барабанных котлах?
2. Каково назначение главного регулятора в схемах регулирования давления?
3. От каких факторов зависит кпд котла?
4. Что понимается под регулированием тепловой нагрузки?
5. Какой сигнал является основным в схеме регулирования разрежения в барабанных котлах?
6. Под влиянием каких факторов изменяется уровень воды в барабане котла?
7. Как формируется сигнал по теплоте в прямоточных котлах?
8. Чем отличаются схемы регулирования температуры острого пара в прямоточных котлах от схем регулирования в барабанных котлах?
9. Для чего предназначен деаэратор?
10. Каково назначение РОУ?

ния в магнитном поле. Роль проводника в расходомере играет электропроводная жидкость, а магнитное поле создается внешними устройствами. Измеряя наведенную эдс, можно определить среднюю скорость жидкости, а следовательно, и ее расход. Удельная электрическая проводимость измеряемой среды должна быть от 10^{-3} до 10 См/м, а температура — до 150°С.

Недостатками электромагнитных расходомеров являются чувствительность к помехам от переменных электромагнитных полей; ограничения по электрической проводимости измеряемой среды.

Ультразвуковые расходомеры служат в основном для измерения расхода жидкостей. Принцип их действия основан на использовании ультразвука, скорость которого относительно трубопровода зависит от скорости измеряемого потока. Эти расходомеры состоят из излучателя и приемника ультразвуковых колебаний. Приемник в виде пьезоэлемента преобразует механическую деформацию, вызванную ультразвуком, в электрический сигнал. Скорость потока определяют измерением интервала времени $\Delta\tau$ прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против него.

По методу измерения интервала $\Delta\tau$ ультразвуковые расходомеры разделяют на частотные, фазовые и время-импульсные.

Достоинствами ультразвуковых расходомеров являются возможность установки прибора на трубопроводах диаметром от 10 мм и более, а также измерение расхода любых жидких сред, их недостатками — необходимость индивидуальной градуировки, зависимость от профиля скоростей, который меняется с изменением расхода, влияние на показания изменений физико-химических свойств вещества и его температуры, от которых зависит скорость ультразвука. Основная погрешность этих расходомеров при отсутствии коррекции на изменение скорости звука составляет 3—4 %.

§ 37. Тепломеры

В теплоэнергетике необходимо измерять расход теплоты, поступаемой с теплоносителем, либо количество теплоты, потребляемой различными установками. В последнее время появились приборы, определяющие расход теплоты в единицу времени *(тепломеры)* и за некоторый промежуток времени *(теплосчетчики)*.

Для определения расхода теплоты при одинаковом рас-

ГЛАВА XIII

ТЕПЛОВЫЕ ЗАЩИТЫ И БЛОКИРОВКИ

§ 81. Общие сведения

В режимах нормальной эксплуатации, когда параметры оборудования поддерживаются автоматическими системами регулирования АСР, оператор наблюдает за работой оборудования по показаниям приборов, вносит коррекцию в соответствии с производственной необходимостью или командами с верхних уровней управления. Неполадки в работе оборудования, вызываемые выходом из строя отдельных агрегатов, могут привести как к резким изменениям его режимов, так и аварийным ситуациям. В режимах, когда возмущения значительны, АСР не могут справиться с поддержанием условий нормальной эксплуатации, поэтому выполняют ряд переключений и взаимосвязанных операций в тепловой схеме для предотвращения аварии и обеспечения сохранности оборудования. Кроме того, из-за сложности оборудования и необходимости выполнения последовательности операций в ограниченные сроки возможны ошибочные действия оперативного персонала, а следовательно, и появление аварийной ситуации.

Во избежание аварийных режимов системы управления оборудованием при чрезмерных отклонениях параметров и для обеспечения безопасности работы снабжают *устройствами технологических защит и блокировок.*

В зависимости от результатов воздействия на оборудование *защиты* подразделяют: на производящие останов или отключение агрегатов; переводящие оборудование в режим пониженных нагрузок; выполняющие локальные операции и переключения; предотвращающие аварийные ситуации.

К блокировкам относят устройства, выполняющие функции атоматических переключений при переходе с нагрузки на нагрузку, включающие резервные агрегаты и механизмы или отдельные элементы тепловой системы в заданной последовательности.

Устройства защит и блокировок должны быть надежными в предаварийных и аварийных ситуациях, т. е. в действиях защит должны отсутствовать отказы или ложные срабатывания. Отказы в действиях защит приводят к несвоевременному отключению оборудования и дальнейшему развитию аварии, а ложные срабатывания выводят оборудование из нормального технологического цикла, что снижает

ходе теплоносителя на входе и выходе используют уравнение: $q = G_м(i_{вх} - i_{вых})$, где $G_м$ — массовый расход теплоносителя; $i_{вх}$, $i_{вых}$ — энтальпии теплоносителя на входе и выходе в систему теплоснабжения или другие теплоэнергетические установки.

В общем случае энтальпия вещества является сложной функцией температуры и давления, например для пара эта зависимость $i = R_1 + R_2 t^\circ/(R_3 + R_4 p)$, где $R_1 - R_4$ — постоянные коэффициенты.

Для воды в системе теплоснабжения ($t^\circ \leqslant 150\,^\circ C$, $p \leqslant 1$ МПа) влиянием давления можно пренебречь, и энтальпия $i = R_5 + R_6 t^\circ$, где R_5, R_6 — постоянные коэффициенты.

Отсюда следует, что в тепломерах необходимо совместно измерять расход теплоносителя, его температуру и давление. Если промышленные расходомеры измеряют объемный расход теплоносителя, полученное значение умножают на его плотность, которая зависит от температуры t° (для жидкостей); температуры t° и давления p (для пара и газа).

Расход теплоты q определяется в вычислительных устройствах по сигналам расходомеров, термометров и манометров. Схема таких устройств зависит от вида выходных сигналов приборов. В качестве тепломера, используемого при автоматизации систем теплоснабжения, служит разностный теплосчетчик ТС-20, оснащенный индукционным расходомером.

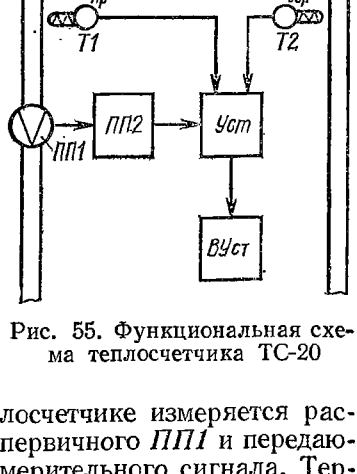


Рис. 55. Функциональная схема теплосчетчика ТС-20

Функциональная схема теплосчетчика ТС-20 показана на рис. 55. Расход воды в теплосчетчике измеряется расходомером, который состоит из первичного *ПП1* и передающего *ПП2* преобразователей измерительного сигнала. Термометрами сопротивления *Т1* и *Т2* определяют температуру прямой $t^\circ_{пр}$ и обратной $t^\circ_{обр}$ воды, после чего измерительные сигналы преобразуются в устройстве *Уст* в унифицированные электрические сигналы. В вычислительное устройство *ВУст* от *ПП* и *Уст* поступают унифицированные измерительные сигналы, по которым определяют расход теплоты Q, фиксируемый измерительным прибором.

эффективность его работы. Для удовлетворения этих требований используют высоконадежные приборы и устройства, а также соответствующие построения схем защиты.

В защиты и блокировки входят источники дискретной информации — датчики, контактные приборы, вспомогательные контакты, логические элементы и релейная цепь управления.

В схемах защит основными элементами являются устройства, реализующие определенные логические операции («закрыто — открыто», «включено — отключено», «да — нет»), т. е. имеющие два устойчивых состояния. Обычно в электрических схемах это два уровня сигнала, один из которых рассматривают как 1 (включено), а другой — как 0 (отключено). Сочетание некоторого числа таких двоичных элементов в определенной последовательности может дать логическую систему, реализующую сложную логическую функцию.

Основными элементарными логическими функциями являются И, ИЛИ, НЕ и др.

Реализация функции *логического усиления* означает, что сигнал на выходе устройства появится одновременно с сигналом входа x, но усиленный в К раз. Схема этой функции показана на рис. 138, *а*.

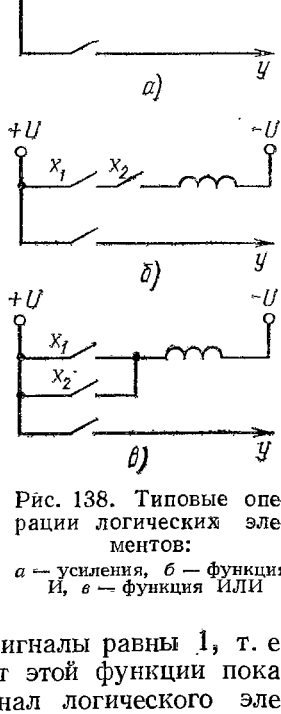


Рис. 138. Типовые операции логических элементов:
а — усиления, *б* — функция И, *в* — функция ИЛИ

Функция И, называемая также *логическим умножением*, реализуется элементом, на выходе которого появляется сигнал только тогда, когда на входе устройства все сигналы равны 1, т. е. присутствуют. Релейный эквивалент этой функции показан на рис. 138, *б*. Выходной сигнал логического элемента y вводится в цепь коммутационного устройства электропривода исполнительных механизмов.

Логическое сложение, обозначаемое как функция ИЛИ, означает, что на выходе элемента, реализующего эту функцию, сигнал появится только тогда, когда имеется сигнал хотя бы на одном из входов. Релейный эквивалент этой зависимости для двух сигналов x_1 и x_2 показан на рис. 138, *в*.

На некоторых ТЭС в качестве топлива используют, например, угли, сланцы, торф, при этом требуется непрерывно измерять расход твердого топлива, которое в измельченном виде поступает либо в бункер пыли, либо по транспортеру непосредственно в топку котла со слоевым сжиганием топлива. Применяемые пружинные измерители массы поступающей в котел угольной пыли не всегда являются эффективными. В последнее время для измерения расхода твердых веществ получили распространение приборы с магнитоупругими материалами. Под действием нагрузки происходит изгиб их чувствительного элемента, состоящего из этих материалов, в результате чего изменяются его магнитные свойства. В стержне чувствительного элемента имеется ряд отверстий, через которые проходят обмотка возбуждения, питаемая переменным электрическим током, и две выходные обмотки, включенные встречно, в которых возникает эдс магнитной индукции. В ненагруженном состоянии результирующая эдс равна нулю. При изгибе чувствительного элемента его магнитные свойства меняются и результирующая эдс оказывается пропорциональной приложенной нагрузке. Выходной измерительный сигнал можно дистанционно передавать к вторичным приборам. При транспортировке угольной пыли воздухом ее расход косвенно оценивают по перепаду давления на сегментной диафрагме в газопроводе.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются расходомеры от счетчиков?
2. Какие виды сужающих устройств применяют при измерении расхода?
3. Когда не допускается применять расходомеры с переменным перепадом давления?
4. Когда используют уравнительные сосуды и как прокладывают соединительные линии к дифманометрам?
5. Где устанавливают ротаметры и каков их принцип действия?
6. Как устроены скоростные и объемные счетчики?
7. В чем преимущества и недостатки электромагнитных и ультразвуковых расходомеров?

Выходной сигнал можно реализовать и для бо́льшего числа входов.

Операция НЕ для элемента, реализующего ее, означает, что на выходе сигнал y отсутствует, если имеется сигнал x на входе элемента. Логические элементы изготовляют как контактными, так и бесконтактными. В последнее время логические элементы выполняют на тиристорах. При построении промышленных систем автоматических защит ис-

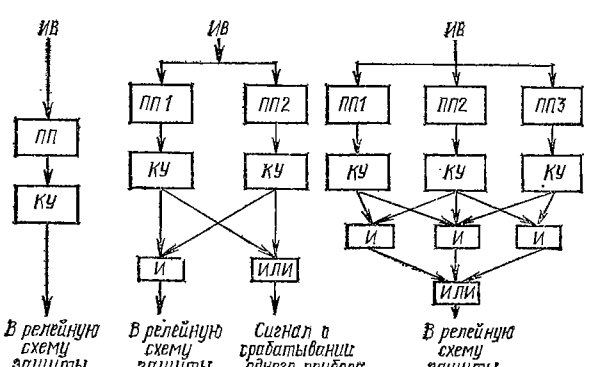


Рис. 139. Структурные схемы включения приборов защиты:

а — с одним прибором, *б* — с двумя приборами с одинаковыми уставками, *в* — с тремя приборами с одинаковыми уставками; *ИВ* — измеряемая величина, *КУ* — контактное устройство, *ПП1* — *ПП3* — первичные приборы

пользуют набор логических элементов различного функционального назначения, варьируя их в тех или иных сочетаниях.

Для обеспечения высокой надежности действия защит применяют схемы соединения приборов с включением логических элементов. Выбор схемы зависит от важности технологической защиты. Основными являются схемы с одним прибором, с двумя приборами (датчиками) с одинаковыми и разными уставками, с тремя приборами (датчиками) с одинаковыми уставками. Каждая из схем имеет свои особенности, что определяет возможность их использования для защиты оборудования.

В схемах с одним прибором (рис. 139, *а*) применяют высоконадежные первичные приборы; схемы устанавливают на оборудование, где ложное срабатывание не влечет за собой тяжелой аварии, например включение резервных механизмов с параллельно работающими.

ГЛАВА VI

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ И СЫПУЧИХ ВЕЩЕСТВ

§ 38. Общие сведения

Контроль и измерение уровня различных веществ на ТЭС связаны с безопасностью и надежностью работы основного и вспомогательного оборудования, с предупреждением аварийных ситуаций. Приборы, измеряющие уровень вещества, называют *уровнемерами*. Уровнемеры, которые контролируют отклонение уровня от номинального значения, имеют двустороннюю шкалу, а уровнемеры, которые служат для определения количества вещества в сосуде,— одностороннюю шкалу. Первый тип уровнемеров дополнительно снабжают устройствами сигнализации предельных отклонений уровня от заданного значения.

На ТЭС измеряют линейными мерами длины (метры, сантиметры) уровень воды в барабане котла, регенеративных подогревателях, конденсаторе и в других резервуарах ее тепловой схемы.

В зависимости от параметров измеряемой среды и условий измерения применяют различные методы и средства измерений уровня. Оперативный контроль за уровнем вещества осуществляют визуально по водомерным стеклам, поплавковым уровнемерам или показывающим дифманометрам, установленным по месту измерения. При необходимости дистанционной передачи измерительных сигналов к вторичным приборам используют дифманометрические уровнемеры с промежуточными преобразователями, а также емкостные, индуктивные, радиоизотопные и акустические. Некоторые виды уровнемеров, встречающиеся на ТЭС, рассматриваются ниже.

§ 39. Водомерные стекла и поплавковые уровнемеры

Визуальное измерение уровня жидкости в различных теплоэнергетических установках осуществляют по водомерным стеклам. При невысоком давлении среды водомерное стекло представляет собой изогнутую стеклянную трубку, сообщающуюся с газовым и жидкостным объемами резервуара (рис. 56). Показания считывают по делениям на трубке. При повышенном давлении среды в корпусе резервуара устанавливают плоские стекла, располагае-

В схемах с двумя датчиками с одинаковыми уставками используют логический элемент И (рис. 139, *б*) либо ИЛИ. Схемы с элементом И выполняют для защит, когда следует уменьшить вероятность ложного срабатывания и датчики не обладают достаточной надежностью. Логический элемент ИЛИ используют в этих схемах («два из двух») для повышения надежности защиты, т. е. уменьшения отказов в работе. Кроме того, имеются схемы «два из двух» с разными уставками срабатывания, которые применяют в схемах двухступенчатой защиты. В этом случае первая защита настраивается на срабатывание, если параметр достиг первого аварийного уровня. При действии первого уровня выполняются локальные операции по предотвращению аварии, а контактное устройство второго уровня, превышающее первую уставку, настраивается на вторую уставку.

Для схем, состоящих из трех датчиков с одинаковыми уставками («два из трех»), используют логические элементы И и ИЛИ (рис. 139, *в*). При этом общая их надежность повышается, но возрастают объем профилактических работ, количество и стоимость защитного оборудования.

Следует отметить, что срабатывание защит должно обеспечивать однозначность действия, при этом перевод оборудования в рабочий режим после отключения его защитой осуществляется после проверки и устранения причин, вызвавших срабатывание. При проектировании тепловых защит котлов, турбин и другого теплового оборудования предусматривают так называемый приоритет действия защит, т. е. выполнение в первую очередь операций для той из защит, которая вызывает бо́льшую степень разгрузки. Все защиты имеют независимые источники питания и возможность фиксации причин срабатывания, а также световую и звуковую сигнализации.

§ 82. Тепловые защиты барабанных и прямоточных котлов

Правилами технической эксплуатации ПТЭ для паровых котлов из-за опасности возможных нарушений технологии предусматриваются различные тепловые защиты, которые можно разделить на две группы: защиты, действующие на останов котла, и защиты, переводящие оборудование в режим пониженных нагрузок. Рассмотрим основные защиты барабанного котла (рис. 140).

При нарушении режима горения действует тепловая защита котла от потухания и погасания факела. Эта защита

мые в шахматном порядке (из условий прочности), чтобы их диапазоны измерения уровня перекрывались.

Уровнемеры работают по принципу сообщающихся сосудов. Основным источником погрешности уровнемеров является разница плотностей жидкости в резервуаре и трубке из-за различия их температур: $\Delta h = h_2 - h_1 = h_2(1 - \rho_2/\rho_1)$, где ρ_1, ρ_2 — плотности жидкости в резервуаре и трубке. Обычно показания уровня по водомерному стеклу меньше действительного уровня, поэтому необходима либо тепловая изоляция стекла трубки, либо ее продувка жидкостью из резервуара.



Рис. 56. Схема измерения уровня с помощью водомерного стекла

Уровень жидкости в резервуарах, находящихся под атмосферным или вакуумметрическим давлением, измеряют с помощью простого технического устройства — поплавка или буйка. В этом случае указатель уровня связан с поплавком (буйком) гибкой (трос, лента) или жесткой механической связью. С изменением высоты уровня меняется положение поплавка (буйка), а следовательно, и указателя. Однако при изменении плотности жидкости $\Delta\rho_ж$ изменяется объем погруженной части поплавка (буйка), что приводит к возникновению дополнительной погрешности в определении уровня $\Delta h = \frac{\Delta V_п}{S} = -\frac{V_п}{S}\frac{\Delta\rho_ж}{\rho_ж}$, где $V_п$ и $\Delta V_п$ — объем погруженной части поплавка (буйка) и его изменение; S — площадь поперечного сечения резервуара.

Для дистанционного измерения уровня жидкости широко применяют буйковые уровнемеры УБ-Э и УБ-П соответственно с унифицированным выходным сигналом постоянного электрического тока или пневматическим. Измерительный сигнал преобразуется на основе электросиловой или пневмосиловой компенсации усилия, развиваемого буйком уровнемера, погруженного в жидкость. Уровнемеры УБ-Э и УБ-П служат для измерения уровня в объектах с температурой не более 400 °С и допустимым рабочим давлением 10 МПа. Диапазон измерения этих уровнемеров 0—1,6 или 0—0,04 м, класс точности 1; 1,5.

Достоинствами поплавковых уровнемеров являются простота устройства, широкий диапазон измерений, необ-

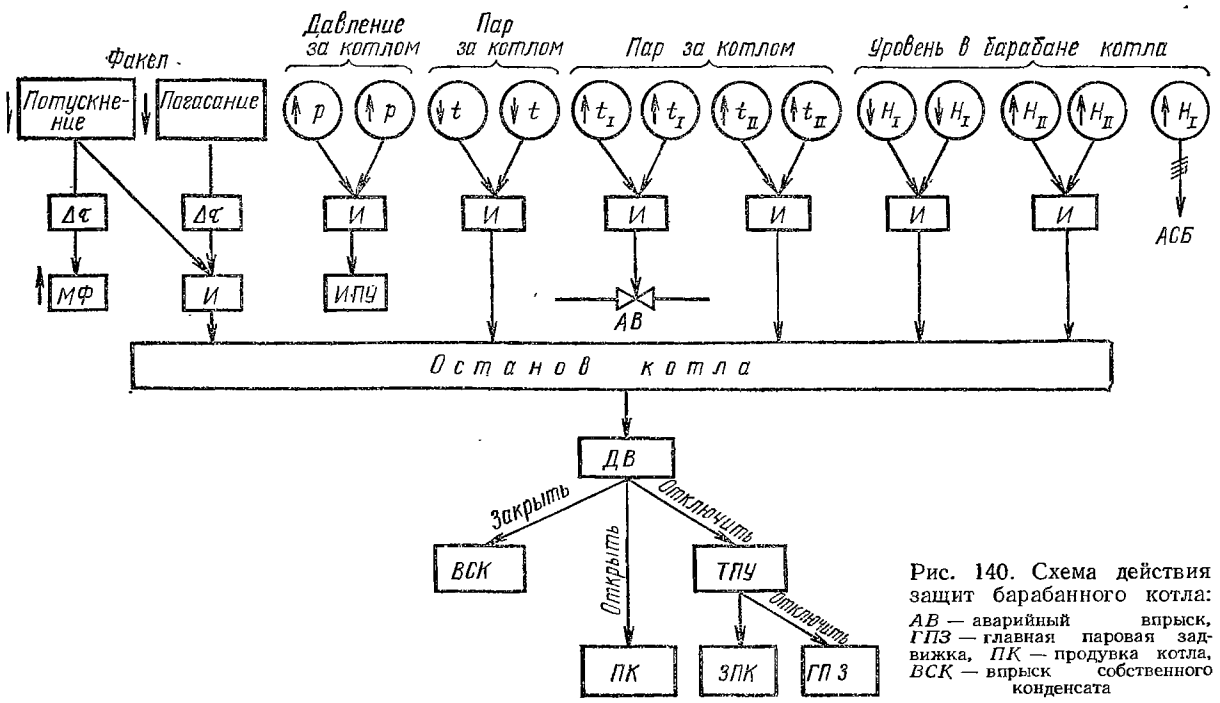


Рис. 140. Схема действия защит барабанного котла:
АВ — аварийный впрыск, *ГПЗ* — главная паровая задвижка, *ПК* — продувка котла, *ВСК* — впрыск собственного конденсата

ходимая точность измерений в широком диапазоне температур, возможность измерения уровня агрессивных и вязких сред, а их недостатками — необходимость установки поплавка (буйка) в резервуаре, трудность измерения уровня в резервуаре под давлением, герметизация измерительного устройства.

§ 40. Гидростатические уровнемеры

В мощных котлах производительностью более 35 т/ч для измерения уровня в их барабанах, а также в других резервуарах широко применяют дифманометры со вторичными показывающими приборами, снабженными электроконтактными устройствами. С помощью этих устройств осуществляется защита от перепитки котла водой и от упуска воды из резервуара.

Принцип действия гидростатических уровнемеров основан на измерении давления, создаваемого уровнем h жидкости: $p=h\rho g$, где ρ — плотность измеряемой среды.

Гидростатическое давление измеряют дифманометром, поэтому и уровнемеры называют *дифманометрическими*. Из приведенного выше выражения видно, что показания дифманометра зависят от плотности измеряемой жидкости. Поскольку жидкость может находиться под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, необходимо учитывать это при выборе типа дифманометра и вида уравнительных сосудов. Если дифманометр подсоединяют без уравнительного сосуда, уменьшается диапазон его измерений на $\Delta p=h_0\rho g$, где h_0 — высота нижней отметки резервуара до дифманометра. При измерении уровня агрессивных и вязких сред применяют разделительные сосуды, которые размещаются в нижней точке соединительных линий ближе к резервуару.

Схема измерения уровня нейтральной невязкой жидкости, находящейся в резервуаре под атмосферным давлением, показана на рис. 57. Дифманометром *2* измеряют разность давления $\Delta p=p_1-p_2=(H+h_1)\rho_1 g-h_2\rho_2 g$. Если плотности жидкостей в соединительных линиях одинаковы при $h_1=h_2$, то $\Delta p=H\rho g$.

Для обеспечения равенства уровней $h_1=h_2=\text{const}$ на одной соединительной линии устанавливают уравнительный сосуд *1*, сечение которого намного больше сечения линии. Этот сосуд и соединительную линию заливают жидкостью до определенной отметки, принятой за начальную отметку шкалы уровнемера.

предусмотрена для всех газомазутных и пылеугольных котлов. В схеме в качестве первичных приборов (датчиков) используют фоторезисторы, контакты которых с логическим элементом И соединены с отключающим устройством, действующим на дутьевые вентиляторы, а по системе блокировок — на другие агрегаты. Между датчиком и логическим элементом устанавливают реле задержки $\Delta\tau$ с выдержкой времени до 10 с. Необходимость этого реле объясняется следующим. При снижении уровня светимости факела для предотвращения останова котла или при поступлении ложных срабатываний защита действует на включение резервных мазутных форсунок. Выдержка времени до 10 с гарантирует также безопасное повторное зажигание факела за счет аккумуляции теплоты в топке. Защита котла от погасания факела снабжена системой сигнализации.

При чрезмерном понижении температуры пара за котлом срабатывают автоматические защитные устройства, которые предохраняют паропровод и проточную часть турбины от заброса частиц влаги. Защита выполнена на логических элементах И, первичным датчиком ее является термопара. Сигнал от термопары, усиленный в усилителе, поступает на логический элемент, передающий команду на останов вентилятора, а затем по линии электроблокировок на останов других агрегатов котла. Для блочных установок эта защита относится к турбине. В этом случае используется схема «два из двух» и температура пара измеряется стандартными термопарами в паропроводе на выходе из котла и в стопорных клапанах турбины. Агрегат отключается при понижении температуры пара в стопорных клапанах, если в любом из подводящих паропроводов температура пара также снизилась. Такое же устройство имеет защита по повышению температуры перегрева первичного пара t_{II}.

Для барабанных котлов одной из важнейших является защита от понижения уровня $H_б$ в барабане, которая выполняется двухступенчатой и предохраняет экранные трубы от пережога. При уменьшении уровня в барабане ниже установленного предела (120 мм) включается схема с логическим элементом И через промежуточное реле, блокировки на отключающее устройство дутьевого вентилятора *ДВ* и на отключение топливоподачи *ТПУ*. Защита от повышения уровня $H_б$ выполняется также на элементах И двухступенчатой, т. е. первичные приборы имеют разные уставки. При увеличении уровня в барабане (более 100 мм) срабатывает защита первого уровня, которая воздействует на аварийный слив из барабана *АСБ*. В этом случае защита не вызывает

Измерение уровня воды в резервуарах с вакуумметрическим давлением, например в конденсаторах паровых турбин ТЭС, имеет важное значение при их эксплуатации. Так, при уменьшении уровня в конденсаторе ухудшается напор на всасе конденсатного насоса и снижается вакуум, что ухудшает экономичность работы турбины, а при повышении уровня в турбину может попасть конденсат. Для большей надежности уровень контролируют по месту и дистанционно.

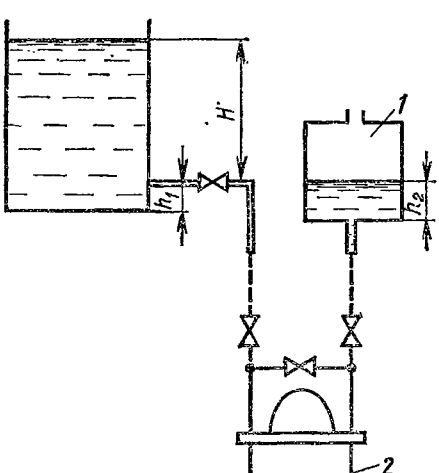


Рис. 57. Схема измерения дифманометром уровня жидкости, находящейся в резервуаре под атмосферным давлением

Дифманометр *6* присоединяют к конденсатору с помощью однокамерного уравнительного сосуда *4* (рис. 58). Уравнительный сосуд с помощью трубки *2* соединен с паровым пространством конденсатора *1*, а линия *7* присоединена ко всасывающей линии конденсатного насоса. По линии *3* в уравнительный сосуд непрерывно поступает в небольшом количестве конденсат *5* из напорной трубы насоса. При этом уровень в уравнительном сосуде поддерживается постоянным, так как избыток стекает в конденсатор по трубке *2*. Температура стенок уравнительного сосуда и конденсатора мало отличается от температуры окружающего воздуха. С учетом того, что $\rho_п \ll \rho_в$, перепад давления на дифманометре $\Delta p = (H - h)\rho_в g$, где $\rho_в$ — плотность воды в трубах; $\rho_п$ — плотность пара.

отключения котла, т. е. действует как локальная защита. Если защита первого уровня сработала, а уровень повышается и достигает второй контрольной отметки, срабатывает защита второго уровня, что вызывает останов котла и дутьевого вентилятора, закрытие запорного питательного клапана *ЗПК* и отключение главной паровой задвижки.

На котле имеются и другие защиты, которые также можно назвать локальными, например защита по давлению пара за котлом, исполнительным устройством которой является импульсное предохранительное устройство *ИПУ*, получающее сигнал на срабатывание при увеличении давления выше допустимого. Это устройство, устанавливаемое на выходных коллекторах, срабатывает раньше, чем предохранительные клапаны в барабане котла. Избыточный пар сбрасывается в атмосферу.

Защита от повышения температуры пара за котлом $t_{\text{п}}$ действует так же, как локальная, поскольку при превышении заданных уставок включает аварийный впрыск *АВ*, не останавливая котла.

При неполадках в работе вентиляторов, дымососов, воздухоподогревателей срабатывают защиты, которые переводят котел на сниженные нагрузки, а при значительных неисправностях останавливают его.

Для прямоточных котлов предусматриваются все защиты, имеющиеся на барабанных, за исключением защиты по уровню в барабане. Однако при наличии принудительной циркуляции в котле и других особенностей требуются дополнительные защиты.

Схема действия защит (рис. 141), отражает конструктивные и технологические особенности прямоточного котла.

Защита, выполняющая останов котла, при нарушениях подачи питательной воды *ПВ* начинает действовать с уменьшением ее расхода $D_{\text{пв}}$ до 30 % номинального. В схему защиты поступает также сигнал по давлению за регулирующим питательным клапаном $p_{\text{рпк}}$. Таким образом логический элемент И включает релейную схему, если наряду с сигналом по расходу питательной воды имеется подтверждающий сигнал по давлению за регулирующим питательным клапаном. При этом защита срабатывает на включение резервных питательных насосов. Если зафиксирован отказ в работе резервных питательных насосов, то защита отключает через некоторое время ($\Delta\tau = 15 \div 20$ с) паровой котел, производя через блокировки все необходимые операции по его останову.

Защита от разрыва труб водяного экономайзера сраба-

Такую же схему измерения уровня используют в резервуарах с невысоким давлением и сетевых подогревателях (до 4 МПа). В этом случае разность давлений $\Delta p=[H(\rho_в-\rho_п)-h(\rho_к-\rho_п)]g=(H\rho_в-h\rho_к)g$ также пропорциональна уровню конденсата греющей среды, где $\rho_к$ — плотность конденсата.

Плотности $\rho_к$ и $\rho_п$ зависят от температуры и давления измеряемой среды. Влияние температуры на разность дав-

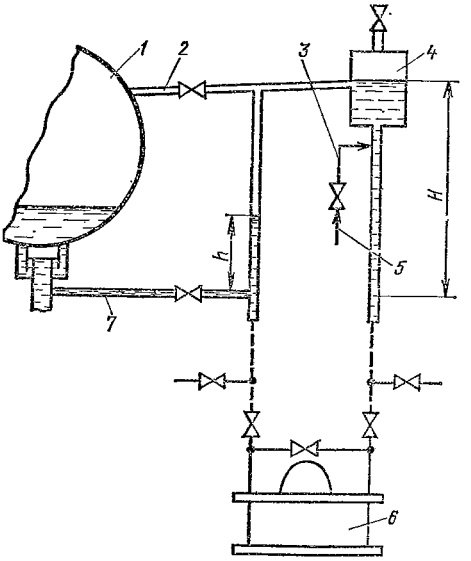


Рис. 58. Схема измерения дифманометром уровня воды в конденсаторе турбины:
1 — конденсатор, *2* — трубка, *3*, *7* — линии, *4* — уравнительный сосуд, *5* — конденсат, *6* — дифманометр

лений Δp проявляется в переменных режимах работы котла, а также при изменении температуры окружающего воздуха $t°_{окр}$, от которой зависит плотность воды $\rho_в$. Для уменьшения влияния $t°_{окр}$ уравнительный сосуд и соединительные линии покрывают тепловой изоляцией, обеспечивая подпитку сосуда водой для постоянного уровня в нем. Давление среды меняется также в переходных режимах работы котла, при этом завышаются показания уровнемера при снижении давления по сравнению с расчетным и наоборот, что является недостатком конструкции уравнительного сосуда. Если при измерении уровня жидкости ее плотность непре-

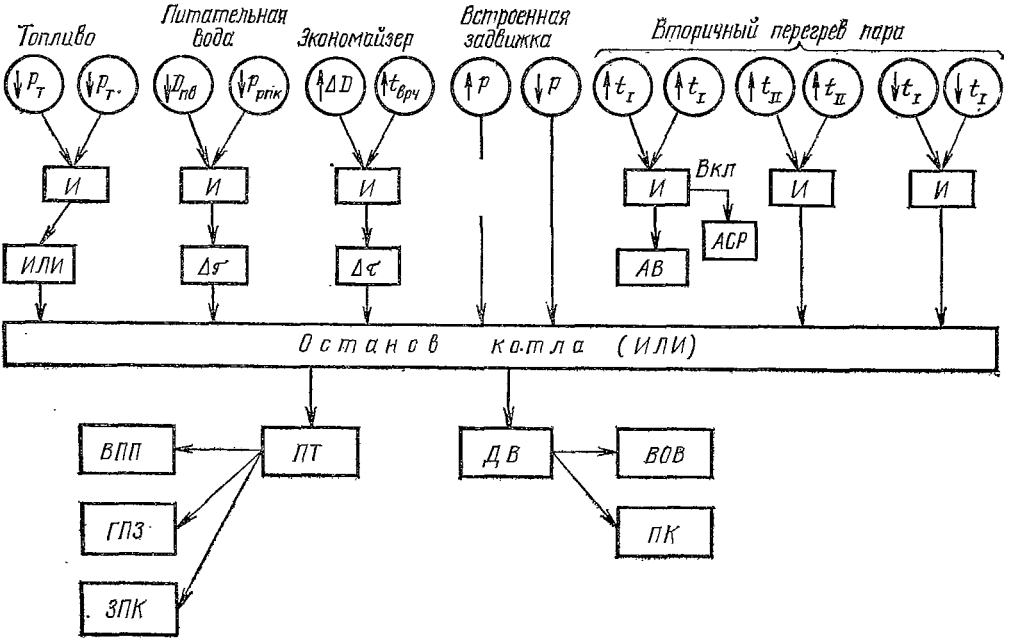


Рис. 141. Схема действия защит прямоточного котла:
ПТ — подача топлива, *ВОВ* — впрыск охлажденной воды, *ДВ* — дутьевой вентилятор, *ВВП* — вторичный перегрев пара

рывно изменяется, шкалу дифманометра рассчитывают для среднего значения плотности этой жидкости. Из-за низкой точности показаний использование однокамерных уравнительных сосудов при измерении уровня с давлением среды более 4 МПа нецелесообразно.

Схема измерения уровня воды дифманометром с помощью комбинированного двухкамерного уравнительного сосуда показана на рис. 59. Этот сосуд используют в барабанах котла с давлением пара до 25 МПа. Особенность его состоит в том, что верхняя часть трубки *3* находится в теплоизолированном сосуде *2*, соединенном горизонтальными трубками с паровым и жидкостным объемами барабана котла. Нижняя часть трубки на высоте h_1 изоляцией не покрывается. Высота h_1 зависит от высоты верхней точки отбора H уравнительного сосуда и уровня в барабане h_0, при этом должна обеспечиваться заданная точность измерения уровня в широком диапазоне изменений давления в барабане котла. Разность давлений, измеряемая дифманометром *4*, $\Delta p=[(H-h_0)\cdot(\rho_к-\rho_п)+h_1(\rho_в-\rho_к)]g$. Уровнемеры с этой схемой измерения гарантируют единство показаний при изменении давления только при номинальном значении измеряемого уровня. С увеличением или уменьшением уровня точность показаний прибора снижается. Для обеспечения необходимой точности измерения уровня важное значение имеет равенство температур в барабане и сосуде *2*. При его нарушении возникает дополнительная ошибка.

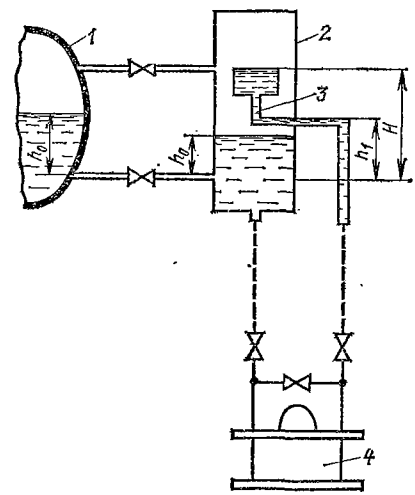


Рис. 59. Схема измерения уровня воды дифманометром с помощью комбинированного уравнительного сосуда в барабане котла

Метод измерения уровня дифманометром отличается от других методов простотой монтажа прибора, надежным контролем уровня в широком диапазоне (от +315 до —315 мм) при номинальном давлении пара.

Недостатками гидростатического метода измерения

тывает при нарушениях нормальной работы испарительного контура. Одним из ее сигналов служит небаланс расходов воды ΔD до и после водяного экономайзера. В качестве подтверждающего сигнала используют повышение температуры пара за верхней радиационной частью $t_{\text{врч}}$. Система защиты останавливает котел с выдержкой времени $\Delta\tau = 20$ с.

Защита от разрыва труб экономайзера при наличии двух сигналов выполняется на логических элементах И. По такой же схеме строят и другие защиты поверхностей нагрева.

Для котлов со сверхкритическими параметрами необходима установка защиты от повышения (понижения) давления пара перед встроенной задвижкой. Эту защиту выполняют по схеме «два из двух» на логических элементах И. Срабатывание ее контактов приводит к отключению котла и агрегатов, обеспечивающих его работу.

Для котлов, работающих на топливе (природном газе или мазуте), предусматривается защита от понижения давления газа перед горелками $p_{\text{т}}$. Закрытие задвижки на газопроводе $Г$ также приводит к останову котла.

Повышение или чрезмерное понижение температуры вторичного перегрева пара очень опасно для оборудования котла. Все остальные защиты выполняют так же, как и защиты барабанного котла.

§ 83. Технологические защиты турбины и вспомогательного оборудования

Основными защитами турбогенераторов являются следующие: защита от увеличения частоты вращения ротора, защита от сдвига ротора, защита от ухудшения вакуума в конденсаторе, защита от понижения давления масла в системе смазки и охлаждения подшипников, а также защита от понижения (повышения) температуры свежего пара перед стопорными клапанами. Схема технологической защиты турбины показана на рис. 142.

Защита от увеличения частоты вращения ротора предохраняет турбину от разгона. При увеличении частоты вращения турбины на 10 % от номинальной срабатывает автомат безопасности, который воздействует на закрытие стопорного клапана $СК$ перед турбиной и прекращение подачи пара в ее проточную часть.

Защиту от сдвига ротора выполняют на приборах, поставляемых комплектно с турбиной. Известно, что осевое смещение $ОС$ ротора ограничивается очень узкими преде-

уровня являются: необходимость надежной тепловой изоляции уравнительных сосудов при высоких параметрах жидкости; появление ошибки в измерении уровня при меняющемся давлении среды в резервуаре. Для устранения последнего недостатка усложняют конструкцию уровнемера — вводят устройство коррекции по давлению, температуре, разности плотностей воды и пара.

§ 41. Емкостные и индуктивные уровнемеры

Принцип действия емкостных уровнемеров основан на зависимости электрической емкости первичного преобразователя, введенного в жидкость, от ее измеряемого уровня. Емкость преобразователя определяют как емкость двух параллельно соединенных конденсаторов, один из которых образован жидкостью и частью электродов, погруженных в нее, а второй — остальной частью электродов и газовым объемом. Емкостные уровнемеры служат для измерения уровня жидкостей с давлением до 6 МПа и температурой от —40° до +200 °С.

Конструкция уровнемеров зависит от электрической проводимости жидкостей. В случае электропроводных жидкостей (удельное сопротивление $r \leqslant 10^5 \div 10^6$ Ом·м) электроды первичного преобразователя покрывают изоляцией.

Форма электродов может быть различной, чаще всего используют цилиндрические электроды, занимающие весь объем жидкости и газового пространства. Схема емкостного уровнемера для измерения уровня неэлектропроводных жидкостей (ПЕ-6) показана на рис. 60, *а*. Преобразователь выполнен в виде цилиндрического конденсатора с двумя коаксиально расположенными электродами *2* и *3*, опущенными в сосуд *1*. На рис. 60, *б* изображена эквивалентная электрическая схема замещения, в которую входят емкости C_1 (уровня жидкости h между электродами *2* и *3*), C_2 (газового пространства между электродами *2* и *3*), $C_и$ (проходного изолятора *4*) и активное сопротивление $R_п$. Емкость C_2



Рис. 60. Емкостный уровнемер для неэлектропроводных жидкостей (*а*) и его эквивалентная электрическая схема (*б*)

лами ($\pm 1{,}2$ мм) для различных типов турбин. При эксплуатации турбин, износе их рабочих поверхностей меняются характеристики и допустимые рабочие усилия вдоль оси ротора. Чрезмерный сдвиг ротора может привести к повреждению концевых уплотнений и лопаточного аппарата турбины. Защита, оснащенная первичным индукционным датчиком, соединяется по схеме «один из одного». Сигнал по напряжению от датчика через реле осевого сдвига действует на электропривод стопорных клапанов, т. е. на прекращение подачи пара в турбину.

Срыв вакуума $V_к$ в конденсаторе турбины приводит к росту температуры пара в ее хвостовой части, температур-

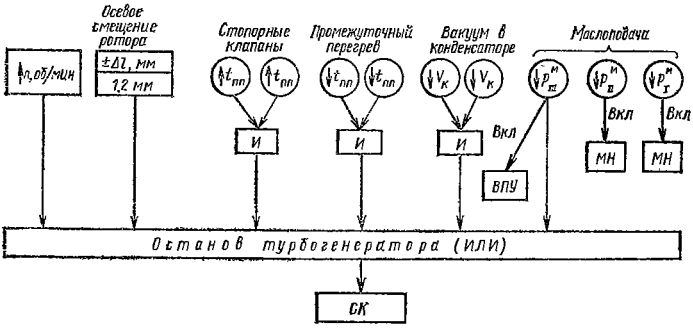


Рис. 142. Схема технологической защиты турбины

ным напряжениям, деформации корпуса и другим последствиям. Для поддержания вакуума предусмотрена защита, закрывающая стопорные клапаны. Сигнал для действия защиты формируется вакуумным реле.

Защиту турбины от понижения давления масла M в системе смазки и охлаждения подшипников выполняют трехступенчатой. Если давление масла, поступающего от системы гидравлического регулирования, падает до первого уровня уставок $p_I^м$ (первой аварийной отметки) включаются резервные маслонасосы $МН$, увеличивающие подачу масла. При дальнейшем падении давления масла до уровня $p_{II}^м$ срабатывает реле давления второго уровня и включается вторая очередь резервных маслонасосов $МН$. При падении давления масла ниже третьей аварийной отметки $p_{III}^м$ срабатывает защита на останов турбины, при этом закрываются стопорные клапаны $СК$, прекращается подача пара на турбину, включается валоповоротное устройство $ВПУ$,

предохраняющее вал турбины от деформаций при его остывании.

Повышение или понижение температуры свежего пара $t_{пп}$ перед стопорными клапанами *СК* является формирующим сигналом для останова турбины. Защиту выполняют по схеме «два из двух» на логическом элементе И, что уменьшает вероятность ее ложных срабатываний.

Работу защит вспомогательного оборудования рассмотрим на схеме действия защиты подогревателей высокого давления *ПВД* (рис. 143), которая предназначена для их предохранения от чрезмерного повышения уровня во избежание заброса воды в паропровод. Причиной переполнения корпуса *ПВД* может быть разрыв змеевиков питательной воды, отказ системы автоматического регулирования и т. д. Первичным прибором защиты является датчик уровня, сигнал которого поступает на промежуточное реле, коммутирующие и исполнительные устройства запорных органов на линии воды и пара. При срабатывании защиты одного из подогревателей отключается вся группа подогревателей, при этом питательная вода подается в котел по обводной линии. При останове группы *Гр ПВД* происходит следующее: закрываются задвижки по питательной воде *ЗПВ* и греющему пару *ЗГП*, включается байпасная (обводная) линия *ПВД*. Отключение по пару выполняется для каждого *ПВД* по этой схеме, по воде — быстродействующими защитными гидроклапанами на входе и выходе *ПВД*.

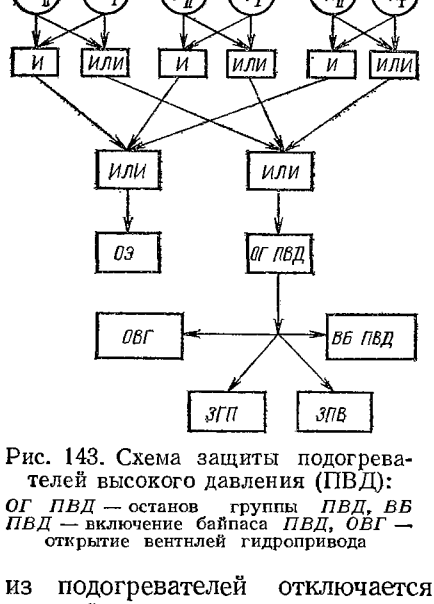


Рис. 143. Схема защиты подогревателей высокого давления (ПВД):
ОГ ПВД — останов группы *ПВД*, *ВБ ПВД* — включение байпаса *ПВД*, *ОВГ* — открытие вентилей гидропривода

Если защита первого уровня сработала, а уровень растет и достигает отметки H_{II}, то включается второй уровень защиты. При срабатывании контактов первичного прибора второго уровня происходит останов энергоблока *ОЭ*.

зависит от уровня h и диэлектрической проницаемости ε жидкости, которая может изменяться с увеличением ее температуры и изменением состава.

Для устранения влияния диэлектрической проницаемости ε на уровень h используют компенсационный конденсатор, который целиком погружен в жидкость, вследствие чего его емкость зависит только от ε. Изменение емкости компенсационного конденсатора используется в измерительной схеме уровнемера в качестве корректирующего сигнала. При наличии активного сопротивления $R_и$ в выходном сопротивлении $Z_{пр}$ (рис. 60, *б*) в измерительной схеме уровнемера появляется сигнал помехи, который вызывает фазовое искажение полезного сигнала. Для уменьшения этого влияния в схему прибора включают фазовый детектор.

Конденсаторные преобразователи для электропроводных жидкостей ПЕИ-1 имеют такое же устройство, что и конденсаторные преобразователи для неэлектропроводных жидкостей ПЕИ-6, но отличаются от них изолированием одного электрода и введением в эквивалентную электрическую схему дополнительных емкостей C_3 (образованной изоляцией электрода в газовом пространстве) и C_4 (образованной изоляцией в объеме жидкости) и сопротивления жидкости $R_ж$.

Электрическую емкость в уровнемерах измеряют с помощью резонансных и мостовых схем. Резонансные схемы (ЭСУ) применяют в емкостных сигнализаторах уровня жидкости и сыпучих веществ, а мостовые схемы (ЭИУ, ДЕУ) — в уровнемерах, работающих в комплекте со вторичными показывающими приборами.

Мостовые схемы строят в виде индуктивно-емкостного моста, состоящего из индуктивностей двух вторичных обмоток трансформатора, который получает питание от генератора синусоидальных колебаний, подстроечного конденсатора и емкости уровнемера ($C_у=C_1+C_2+C_п$). При появлении сигнала разбаланса моста, пропорционального уровню жидкости, происходит его усиление и подача на вторичный прибор (например, на потенциометр КСП-2).

Диапазон измерения уровнемеров зависит от типа преобразователя и составляет от 1 до 20 м; допускаемая основная погрешность — 2,5%. Недостатками емкостных уровнемеров являются невозможность изменения уровня вязких, пленкообразующих, кристаллизирующихся жидкостей, а также высокая чувствительность к изменению диэлектрических свойств жидкости и емкости измерительных проводов.

§ 84. Устройство и назначение технологической сигнализации

Технологическая сигнализация, входящая в систему управления, предназначена для оповещения оперативного персонала о недопустимых отклонениях параметров и режима работы оборудования.

В зависимости от требований, предъявляемых к сигнализации, ее условно можно подразделить на несколько видов:

сигнализация, обеспечивающая надежность и безопасность работы оборудования (например, давление и температура перегретого пара, температура подшипников турбины и насосов);

сигнализация, фиксирующая срабатывание защит оборудования и причин срабатываний;

аварийная сигнализация, оповещающая о недопустимых отклонениях основных параметров и требующая немедленного останова оборудования;

сигнализация вызова к местным щитам и устройствам общестанционного назначения;

сигнализация неисправности электропитания различного оборудования и аппаратуры (например, отключение и включение резервных источников питания, обрывы в схемах электропитания и управления).

Все сигналы поступают на световые и звуковые приборы блочного щита управления. Звуковая сигнализация бывает двух видов: предупредительной (звонок) и аварийной (сирена).

Световую сигнализацию изготовляют в двухцветном исполнении (красные или зеленые лампочки) или с помощью светящихся табло, на которых указывается причина срабатывания сигнализации. Вновь поступившие сигналы на фоне уже контролируемых оператором могут остаться незамеченными, поэтому схемы сигнализации строят так, чтобы новый сигнал выделялся миганием.

Для удобства работы в схемах сигнализации предусматривают раздельное отключение световой и звуковой сигнализации, автоматический съем звукового сигнала через заданный промежуток времени. Схемы сигнализации получают питание от источника постоянного тока *ИП*, что повышает их надежность. Функциональная схема сигнализации показана на рис. 144. Сигнал включения *СВ* сигнализации подается на блок релейного прерывания сигнала *БРП*, а затем параллельно — на световое табло *СТ* и звуковое

Для измерения уровня жидкометаллического теплоносителя служат индуктивные уровнемеры, принцип действия которых основан на зависимости взаимной индукции двух катушек от уровня их погружения в электропроводящую жидкость. По обмотке возбуждения проходит переменный ток, который способствует возникновению напряжения на выходе $U_{вых}$, пропорционального уровню жидкости, снимаемому со вторичной обмотки. Преобразо-

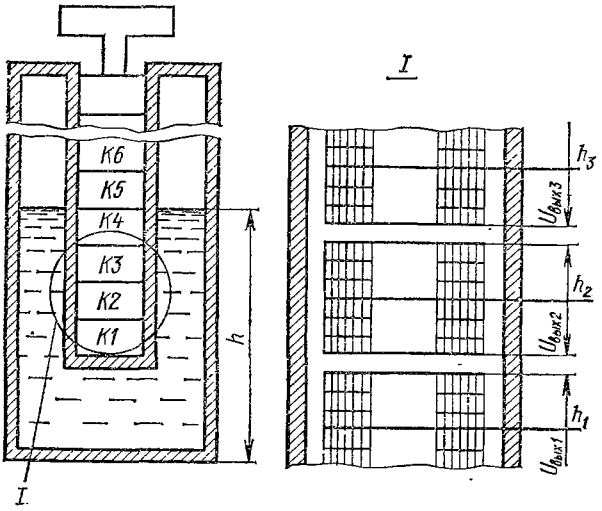


Рис. 61. Схема дискретного сигнализатора уровня в электропроводных жидкостях

ватель устанавливается в защитный металлический чехол, что позволяет при замене уровнемера не нарушать герметичности контура теплоносителя.

Наряду с показывающими измерительными приборами получили распространение дискретные сигнализаторы уровня. В этих приборах при достижении верхнего (две вторичные обмотки находятся в жидкости) или нижнего (две вторичные обмотки находятся вне жидкости) уровня выходной сигнал $U_{вых}=0$, так как две вторичные обмотки включены встречно. На таком принципе действия работает дискретный уровнемер, который состоит из нескольких катушек индуктивности K (рис. 61), размещенных в металлическом чехле вертикально. При изменении уровня с помощью логического устройства определяется катушка с $U_{вых}\neq 0$, по которой и находят уровень. В этом приборе показания не зависят от из-

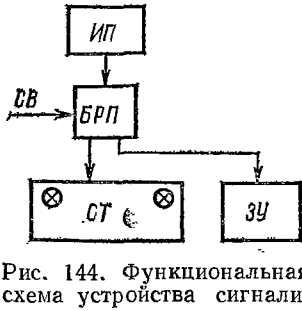


Рис. 144. Функциональная схема устройства сигнализации

устройство *ЗУ*. При этом в *БРП* схема выполнена так, что обеспечивает прерывистое свечение на табло и постоянный звуковой сигнал. На современных тепловых станциях сигнализацию о параметрах и состоянии оборудования выполняют так, чтобы охватить в схеме группу параметров или агрегатов, объединенных по какому-либо признаку (например, контроль и сигнализация температуры подшипников, группы вентиляторов, насосов). Электрические схемы выполняют как на контактных элементах (реле), так и на тиристорах.

§ 85. Схема управления электродвигателями собственных нужд

При срабатывании технологических защит и блокировок довольно часто возникает необходимость включения резервных механизмов, аварийных устройств и других агрегатов, имеющих электродвигатели исполнительных устройств. Командный сигнал воздействует на устройство логического управления, которое включает регулирующие или запорные механизмы. Устройство логического управления состоит из набора логических элементов, выполняющих простые функции. Последовательность логических действий позволяет составить программу управления оборудованием собственных нужд. Вместе с электрической цепью пуска электродвигателей собственных нужд можно реализовать дистанционно или по сигналам защиты пуск вспомогательного оборудования.

Рассмотрим пуск электродвигателя с помощью магнитного пускателя (рис. 145). Магнитный пускатель *ПМ*, находящийся постоянно под напряжением, предназначен для включения двигателя собственных нужд *Д* при нормальных нагрузках, вследствие чего схема имеет определенные особенности. Сигнал на включение (отключение) электродвигателя подается с цепей защиты *ЦЗ* или контактов автоматического включения резерва *АВР* не на магнитный пускатель *ПМ*, а на промежуточный элемент — двухпозиционное реле *РФ*. Это реле управляет включением или отключением магнитного пускателя, при этом замыкаются

менения температуры среды и наличия на чехле пленок расплава или оксидов. В настоящее время выпускают индуктивные уровнемеры «Квант» с предельной температурой измеряемой среды до 680 °С.

§ 42. Радиоизотопные и акустические уровнемеры

Для измерения уровня агрессивных горючих жидкостей без соприкосновения с ними применяют радиоизотопные уровнемеры, которые состоят из излучателя γ-лучей (радиоизотопа) и приемника излучения (счетчика), устанавливаемых в одной горизонтальной плоскости. При прохождении жидкости через эту плоскость резко уменьшается интенсивность излучения, в результате чего изменяется выходной сигнал вторичного прибора. Схема прибора построена по компенсационному принципу. При изменении уровня в измерительной цепи появляется сигнал, воздействующий на устройство обратной связи, которое, в свою очередь, перемещает источник и приемник γ-излучения. Перемещение происходит до такого уровня жидкости, при котором сигнал в цепи приемника пропадает. Уровнемер УР-8 рассчитан на диапазон измерения 0—2 и 0—10 м, при этом погрешность измерения около ±10 мм. Из-за радиоактивного излучения, опасного для обслуживающего персонала, радиоизотопные уровнемеры применяют ограниченно.

Более безопасными при эксплуатации являются акустические или ультразвуковые уровнемеры, принцип действия которых основан на эффекте отражения ультразвуковых волн от границы раздела жидкости и газа. Уровень жидкости в них зависит от времени прохождения этих волн от источника до приемника.

В одних уровнемерах (акустических) ультразвуковые волны идут через газовую среду, что обусловливает независимость показаний прибора от вида жидкости (однородная, неоднородная, агрессивная), которая может находиться под давлением до 4 МПа и иметь температуру от 5 до 80 °С. В других уровнемерах (ультразвуковых) источник установлен под резервуаром, и ультразвуковые волны распространяются в жидкостной среде. Эти уровнемеры используют только для однородных жидкостей, поэтому они не получили широкого распространения.

Структурная схема акустического уровнемера ЭХО-1 показана на рис. 62. Генератор *Г* вырабатывает электрические импульсы с заданной частотой. Под их действием акустический преобразователь *АПр* распространяет ультра-

контакты магнитного пускателя *КПМ*, включая двигатель. Если кратковременно (до нескольких секунд) напряжение исчезает, цепь продолжает работать и обеспечивает включение аппарата при восстановлении напряжения. Реле *РВ* выполняет роль защитного элемента, а также контролирует наличие напряжения после установочного аппарата *В*. При отключенном электродвигателе реле *РВ* включено в силовую цепь через постоянно замкнутые контакты реле *КР*, а при включенном электродвигателе — через контакты магнитного пускателя.

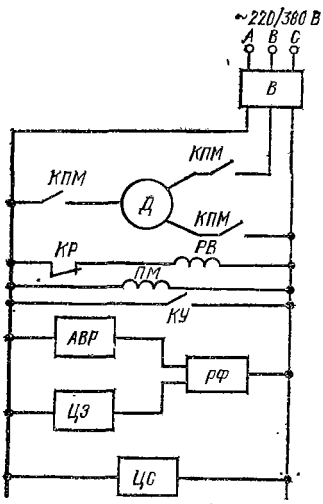


Рис. 145. Схема управления электродвигателем

Цепи управления могут работать от действия оператора через ключ управления *КУ* или же по командам от цепи защиты (отключение) и сигналам *АВР* (включение). Схема устойчиво работает как в режимах пуска — останова, так и в нормальных рабочих режимах. При длительных исчезновениях напряжения схема отключает пускатель через реле *РФ*, чем обеспечивает защиту электродвигателя и разгрузку питающего трансформатора.

§ 86. Особенности монтажа, эксплуатации и обслуживания средств автоматизации

Монтаж, эксплуатация и обслуживание технических средств автоматизации на промышленных предприятиях имеют ряд особенностей.

Установка и крепление регуляторов и комплектующих изделий выполняются на диспетчерских щитах и пультах. По конструктивному оформлению щиты подразделяют на панельные и шкафные. Панельные щиты устанавливают в специальных помещениях, диспетчерских пунктах, где поддерживаются заданные температура и влажность.

Шкафная компоновка приборов и средств автоматизации позволяет располагать щиты непосредственно в рабочих помещениях, так как корпуса шкафов защищают аппара-

звуковые волны, которые в воздушной среде идут к жидкости, а от нее снова к тому же преобразователю. Отраженные импульсы преобразуются в электрические, усиливаются усилителем *Ус* и подаются в триггер *Трг*, с помощью которого измеряется время запаздывания отраженного сигнала. Далее устройство *У1* преобразует значение вре-



Рис. 62. Структурная схема акустического уровнемера ЭХО-1

мени в унифицированный токовый сигнал. В уровнемере предусмотрено также устройство температурной компенсации *У2*. Уровнемеры ЭХО выпускаются класса точности 2,5.

§ 43. Измерение уровня сыпучих тел

На ТЭС уровнемеры необходимы для измерения уровня кускового угля и угольной пыли в бункерах. При выборе технических средств для автоматического контроля уровня учитывают возможность взрыва или самовозгорания материала.

В отличие от жидкости пребывание сыпучих веществ в замкнутом объеме приводит к слипанию отдельных частиц, образованию зависаний на стенках бункера, сводообразованиям, перекосам. Результатом таких явлений может быть отсутствие границы между твердым веществом и газом.

Для измерения уровня сыпучих веществ используют уровнемеры, снабженные вторичными приборами (например, *лотовые*). Их чувствительным элементом является массивное тело, подвешенное на гибком тросе, который кинематической передачей связан с реостатным преобразователем. Цикл работы прибора 6 мин. Для таких измерений можно использовать и емкостные уровнемеры, устройство

туру от случайных повреждений, воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды и предотвращают возникновение взрывов и пожаров.

Для удобства обслуживания к щитам должен быть обеспечен свободный доступ. Монтаж приборов на щите выполняют так, чтобы оператор, ведущий технологический процесс, мог наблюдать и правильно считывать показания регулирующих приборов. При монтаже средств регулирования на щите весь корпус регулирующего блока должен находиться внутри щита, а лицевая панель блока — на его фасаде. Все коммутации между элементами регулирующей аппаратуры выполняют проводами соответствующих сечений (от 0,75 до 1,5 мм²), собранными в жгуты.

В пакеты или жгуты рекомендуется укладывать не более 24 проводов. Все блоки подлежат обязательному заземлению. Присоединение кабельных вводов производят с помощью зажимов, которые внутри шкафов собирают в группы: измерения, автоматизации, сигнализации, питания и т. д. Для изменения монтажа, схемных переключений и других операций предусматривают в каждой группе из шести—десяти зажимов один резервный.

Для каждого типа аппаратуры учитывают дополнительные требования, связанные с условиями ее конструктивного исполнения и указываемые в инструкциях на каждое изделие заводом-изготовителем. Например, блоки системы «Каскад» должны монтироваться в помещениях, защищенных во взрыво- и пожароопасном отношениях и не содержащих агрессивных примесей и пыли. Кроме того, уплотняют шкафы и подают внутрь под небольшим избыточным давлением (98 Па) чистый воздух.

Блоки «Каскад» выдерживают вибрации до 25 Гц с амплитудой не более 1 мм. Для модифицированной серии приборов регулирования «Каскад-2» конструктивное исполнение блоков полностью унифицировано. Все блоки монтируют на одинаковых шасси, вставляемых в металлический сварной корпус, что позволяет быстро менять блоки, используя одни и те же гнезда, а также их композиционное расположение на щите. При этом облегчается доступ к органам настройки, поскольку достаточно лишь частичное выдвижение шасси. Выдвижное шасси соединяется с питанием с помощью гибкого кабеля с разъемной колодкой зажимов. Эта серия аппаратуры по сравнению с блоками системы «Каскад» может эксплуатироваться при более высоком уровне вибрации (5—50 Гц с амплитудой 0,02—11 мм). В свою очередь блоки системы АКЭСР подключаются через

которых было рассмотрено ранее. Основными эксплуатационными факторами, затрудняющими их применение, является зависимость показаний от состава пыли, влажности, ее налипания и разрушения изоляционного покрытия электрода.

Кроме того, применяют также массовые уровнемеры, принцип действия которых основан на взвешивании бункера с пылью. В качестве измерительного преобразователя в них служит гидравлическая мессдоза, которая является опорой для одной из лап бункера. Мессдоза представляет собой стальной корпус с поршнем, заполненный жидкостью. Внутренняя полость корпуса сообщается с манометром, который при нагрузке бункера на поршень измеряет давление жидкости, пропорциональное массе пыли в нем. Погрешность этого способа измерения $\pm 10\%$.

В последнее время вместо мессдоз используют магнитоупругие преобразователи, рассмотренные ранее. Измерительная схема прибора с таким чувствительным элементом построена в виде неуравновешенного моста. В качестве вторичных приборов служат потенциометры или вольтметры.

Кроме измерительных приборов применяют устройства сигнализации предельных уровней сыпучих тел. С помощью сигнализаторов ИКС можно контролировать верхний и нижний уровни в бункере. Принцип действия их основан на замыкании электрической цепи стенка бункера — материал — электрод. Недостатками сигнализаторов являются возможность ложных срабатываний из-за утечек через запыленную среду, механического разрушения электродов.

Контрольные вопросы

1. Как работают водомерные стекла и какие основные погрешности характерны для них?
2. Как устроен поплавковый уровнемер?
3. Для чего нужен уравнительный сосуд при измерении уровня дифманометрами?
4. Чем отличается измерение уровня в конденсаторе турбины по сравнению с барабаном котла?
5. Почему изменяется емкость между электродами в зависимости от уровня?
6. Чем отличаются емкостные уровнемеры для электропроводных и неэлектропроводных жидкостей?
7. Где размещаются источник и приемник ультразвуковых волн при измерении уровня?
8. Каковы причины недостоверности показаний прибора, измеряющего уровень сыпучих веществ?

блоки кондуктивного разделения, в связи с чем повышается помехозащищенность аппаратуры. Функциональные блоки аппаратуры АКЭСР-2 существенно расширяют возможности управления технологическими процессами. На этих блоках, так же как и на «Каскаде-2», все органы статической и динамической настройки расположены на боковой панели и доступ к ним возможен при частичном ее выдвижении. Микроэлектронное исполнение элементов блока позволяет упростить внутренние соединения и, как следствие, повысить надежность. К задней стенке шасси крепится гибкий плоский кабель питания. Вспомогательные блоки выполнены в корпусах меньших размеров, поэтому на одних и тех же щитах размещается большее количество аппаратуры.

Исполнительные механизмы, применяемые на тепловых электростанциях (чаще всего электрические типа МЭО), рассчитаны на работу в условиях от —30° до +60 °С при относительной влажности 30—80% и состоят из реверсивного электродвигателя постоянной скорости и редуктора. Они крепятся непосредственно на специальных конструкциях вблизи исполнительных органов (задвижек, заслонок, клапанов). Для обслуживания этих механизмов следует предусмотреть удобные подходы и возможность монтажа и демонтажа при ремонте.

Сочленения исполнительных механизмов и органов могут быть рычажного и кулачкового типа, с помощью редуктора или тросового соединения. При этом должен обеспечиваться полный ход регулирующего органа. В рабочем состоянии перемещение органов исполнительных механизмов и сочленений должно происходить без люфтов и мертвых зон.

Для открытия и закрытия регулирующих органов на ТЭС служат однооборотные бесконтактные исполнительные механизмы с углом поворота выходного вала не более 360°, которые применяют в системах дистанционного и автоматического управления. Эти механизмы, обладающие высоким быстродействием, могут работать в стопорном режиме без ограничения частоты включений. Полный ход выходного вала легко регулируется настройкой концевых выключателей.

Пневматические исполнительные механизмы при сочленении с регулирующим органом рекомендуется устанавливать в вертикальном положении. Если среда агрессивная, то во избежание попадания агрессивной жидкости и даль-

ГЛАВА VII

АНАЛИЗ СОСТАВА ГАЗОВ И КАЧЕСТВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

§ 44. Общие сведения

Средства измерений, предназначенные для количественного определения состава газов, называют *газоанализаторами*. Эти приборы широко применяют на ТЭС для контроля процесса горения в топках котлов, определения содержания водорода в системе охлаждения обмоток турбогенераторов, анализа газовых технологических смесей для контроля за вредными выбросами продуктов сгорания (NO_2, SO_2) в атмосферу.

Существуют автоматические и переносные газоанализаторы. Автоматические газоанализаторы выполняют в виде показывающих и самопишущих приборов с дистанционной передачей показаний на блочный щит управления и применяют для непрерывного анализа газов в промышленных установках. Переносные газоанализаторы, отличающиеся большей точностью измерений, используют при испытаниях и наладке котлоагрегатов, а также при поверке автоматических газоанализаторов. Шкалы газоанализаторов градуируются в процентах объемного содержания отдельных компонентов в исследуемой газовой смеси. Воспроизведение единиц измерения концентрации компонентов газовых смесей осуществляется на основе эталонных газовых смесей.

Большинство промышленных газоанализаторов предназначено для измерения концентрации одного из компонентов газовой смеси, при этом используется то или иное физико-химическое свойство газа, отличающее его от других газов в смеси. Разнообразие методов измерения обусловлено обширностью анализируемых компонентов газовых смесей и широким диапазоном изменения их концентраций.

Газоанализаторы в отличие от обычных измерительных приборов представляют собой более сложные средства измерений, относящиеся к измерительной установке. Они содержат кроме измерительного преобразователя ряд вспомогательных устройств, обеспечивающих отбор, подготовку и транспортирование пробы газа в прибор.

По принципу действия применяемые на ТЭС газоанализаторы разделяют на термомагнитные, тепловые, электрохимические, оптические, хроматографические.

нейшего разрушения этих механизмов не допускается их установка головкой вниз.

Управляющие вычислительные комплексы (УВК), используемые для управления технологическими процессами, должны располагаться в специальных помещениях, обеспечивающих безотказную работу аппаратуры. Иначе говоря, условия работы УВК должны соответствовать требуемым: температура помещений — 10—40 °С, относительная влажность — 40—90%, высота — 2,6 м. В помещениях не должно быть вибрации выше допустимых пределов, устанавливаемых заводом-изготовителем. Аппаратура УВК должна быть защищена от попадания пыли и вредных соединений. Для создания указанных условий в помещениях, где установлены УВК, используют системы кондиционирования воздуха. Кроме того, всю аппаратуру, создающую магнитные или электрические помехи (силовые трансформаторы, электродвигатели, электросварочные аппараты, электролизеры), необходимо вынести на расстояние, не оказывающее влияния на устойчивую работу УВК. Вычислительный комплекс обеспечивается стабилизированным источником питания (переменное напряжение 220 В, частота 50 Гц) и надежным заземлением всех элементов. Модули этого комплекса располагают на фальш-полу, под которым к каждому из шкафов подводятся питание и другие коммуникации.

Обслуживание технических средств автоматизации предусматривает проведение плановых профилактических ремонтов, обнаружение и устранение текущих неисправностей, замену и восстановление вышедших из строя элементов и поддержание в рабочем состоянии всего комплекса средств автоматизации, обеспечивающих безаварийную работу оборудования. Работы по обслуживанию оборудования, средств измерения и автоматизации на тепловых электрических станциях выполняет группа или цех контрольно-измерительных приборов и автоматизации (КИПиА). Эта организация осуществляет периодическую поверку и ремонт, представление на Госповерку и обслуживание приборов, их паспортизацию, обучает оперативный персонал пользованию средствами КИПиА. Текущую проверку систем регулирования производят, наблюдая за их работой или нанося искусственное возмущение и наблюдая за работой контрольных приборов при отключении и повторном включении регуляторов.

С внедрением на тепловых электрических станциях автоматизированных систем управления технологическими

§ 45. Автоматические термомагнитные газоанализаторы

Принцип действия термомагнитных газоанализаторов основан на различной магнитной восприимчивости газов. Наибольшей способностью к намагничиванию в магнитном поле среди газовых продуктов сгорания обладает кислород, относящийся к парамагнитам. С повышением температуры магнитная восприимчивость у кислорода снижается. Эта особенность используется в термомагнитных газоанализаторах — *кислородомерах*.

Экономичность работы котлоагрегата зависит от содержания кислорода в дымовых газах. Недостаточное количество воздуха, а следовательно, и кислорода в топке приводит к неполному сгоранию топлива и увеличению тепловых потерь с химическим недожогом, а избыточное количество воздуха в топке — к увеличению тепловых потерь с уходящими в атмосферу газами и снижению температуры продуктов сгорания топлива. Последнее обстоятельство ухудшает теплообмен между дымовыми газами и теплоносителем.

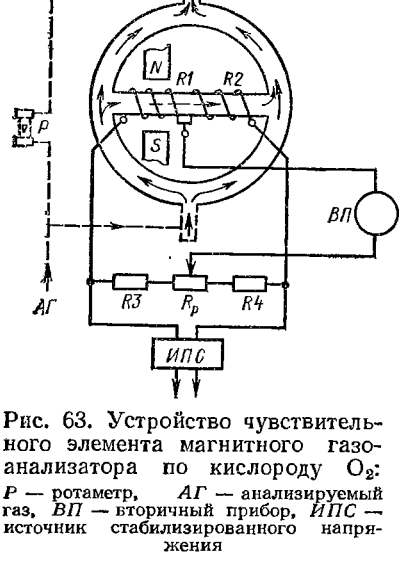


Рис. 63. Устройство чувствительного элемента магнитного газоанализатора по кислороду O_2: *Р* — ротаметр, *АГ* — анализируемый газ, *ВП* — вторичный прибор, *ИПС* — источник стабилизированного напряжения

Существует несколько способов измерения магнитной восприимчивости газовой смеси, которая определяется содержанием в ней кислорода. В промышленных газоанализаторах используется явление термомагнитной конвекции, которое можно понять при рассмотрении устройства чувствительного элемента газоанализаторов МН (рис. 63).

Поток кислородсодержащего газа постоянного давления и расхода (контролируется по ротаметру) подается в кольцевую камеру, где установлена стеклянная трубка с двумя чувствительными платиновыми термометрами сопротивления *R1* и *R2*, нагреваемыми электрическим током до температуры более 100 °С. Вокруг термометра сопротивления

процессами (АСУТП) возникла необходимость организовать в пределах цеха КИПиА группы, обслуживающей эти технические средства.

Группа обслуживания АСУТП состоит из высококвалифицированных специалистов, которые должны знать не только технические средства, но и место, задачи АСУТП в общей многоуровневой системе производства электроэнергии.

На тепловых электростанциях, как сложных объектах управления с многообразием технологических, управленческих и экономических задач, в качестве основного критерия целесообразно выбирать функции *полного дохода* или *общих потерь*. Этот критерий зависит от многих факторов и условий, так как ТЭС работает с непрерывным циклом производства и имеет довольно много ограничений. Поэтому для различных режимов работы ТЭС необходимо иметь определенные алгоритмы управления. Например, оптимальный выбор работающего оборудования, режим работы систем циркуляции, режим проведения ремонтов и т. д.

Кроме того, каждая ТЭС совместно с другими электрическими станциями составляет единую энергосистему. Энергосистемой управляет через центральное диспетчерское управление (ЦДУ) оператор (или оператор с помощью ЭВМ). Сигналы, поступающие с ЦДУ, являются для АСУТП ТЭС (по приоритету) сигналами более высокого уровня и принимаются как команда на изменение режима работы ТЭС. Рассмотрим некоторые задачи, которые возлагаются на АСУТП ТЭС.

Одной из основных задач является расчет технико-экономических параметров (ТЭП). Знание ТЭП позволяет оценить качество ведения технологии, уровень налаженности производства. Если расчет ТЭП выполняется в темпе производства, то такая оперативная информация позволяет эксплуатировать оборудование более экономично, своевременно вмешиваясь в производственный процесс. Без ЭВМ подобное решение проблемы было невозможным, так как информация к оператору приходила бы со значительным запаздыванием.

Технико-экономические параметры, которые рассчитывает АСУ, подразделяют на группы: в первую группу входят параметры, характеризующие режим работы, во вторую — экономичность агрегатов, в третью — позволяющие оценить влияние отклонений основных параметров. При этом в программу расчета ТЭП вносят информацию с первичных датчиков, а также значения кпд агрегатов,

R1 размещены полюсы постоянного магнита. Под действием магнитного поля часть газового потока втягивается в трубку, в которой он охлаждает термометр *R1*; при этом повышается температура и снижается магнитная восприимчивость газового потока. Холодные слои потока, идущие следом, выталкивают нагретые, создавая магнитную конвекцию газового потока. Чем больше содержание кислорода в газе, тем сильнее охлаждается термометр *R1* и тем больше изменяется его сопротивление. В связи с тем что термометр *R2* омывает уже горячий газ, охлаждения его не происходит и сопротивление не меняется.

Рассмотренный принцип действия чувствительного элемента лежит в основе измерительной схемы газоанализатора МН по кислороду. Схема МН, построенная по компенсационно-мостовому методу измерения (рис. 64, *а*), содержит два моста. Первый мост, образованный резисторами *R1* и *R2*, омываемыми анализируемым газом *АГ*, и постоянными *R3* и *R4*, является рабочим *РМ*, второй мост, образованный резисторами *R1* и *R2*, омываемыми воздухом *В* из атмосферы, и постоянными *R3* и *R4*,— мостом сравнения *МС*. Поскольку концентрация кислорода в атмосфере постоянная, то и напряжение моста U_{cd} также постоянное.

При измерении концентрации кислорода в диагонали рабочего моста возникает электрическое напряжение U_{ab}, которое определяют в приборе компенсацией напряжения моста сравнения U_{cd}, снимаемого с реохорда $R_к$. Движок реохорда перемещается автоматически реверсивным двигателем вторичного прибора при наличии сигнала небаланса ΔU. Для проверки начального значения шкалы вторичного прибора в приемнике газовой смеси имеется шунт, который устраняет магнитное поле, в результате чего мост оказывается уравновешенным и напряжение $U_{ab}=0$. Достоинством двухмостовой схемы является независимость показаний прибора от колебаний напряжения питания и температуры окружающей среды из-за их совместного влияния на оба моста. Эту измерительную схему используют в приборах МН5106 и МН5130.

Кроме показывающего прибора в промышленный газоанализатор входит газовый приемник. Схема устройства отбора и подготовки пробы в газоанализаторе МН показана на рис. 64, *б*. Отбор пробы анализируемого газа осуществляется водоструйным эжектором *1*. Через керамический фильтр анализируемый газ по трубке *7* попадает в фильтр *5*, где очищается от сернистого газа и охлаждается проточной водой *6*. Затем он идет в фильтр тонкой очистки *8*, после

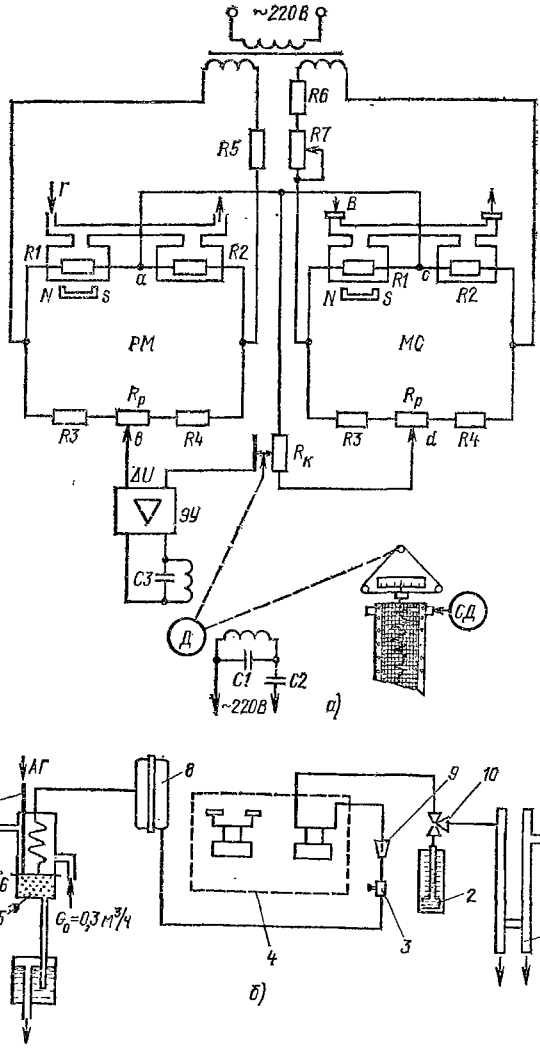


Рис. 64. Схемы автоматического газоанализатора МН:

а — измерительная, *б* — устройства отбора и подготовки пробы; *1* — эжектор, *2* — манометр, *3*, *10* — вентили, *4* — мост, *5*, *8* — фильтры, *6* — вода, *7* — трубка, *9* — ротаметр

которые находят с помощью ЭВМ для периодов: за 15 мин, 1 ч, смену, сутки.

Применение АСУ позволяет также упорядочить составление технической отчетности.

Другой задачей, решаемой с помощью АСУ, является *распределение активной нагрузки между энергоблоками* ТЭС. Эта задача возникает в связи с тем, что на электростанциях применяют разнотипное оборудование: энергоблоки разной мощности, в которых использованы разные виды топлива с разными кпд и техническими характеристиками. Поэтому в различных режимах работы ТЭС оптимальный выбор оборудования определяется множеством взаимосвязанных факторов.

При решении задачи распределения нагрузки между агрегатами используют метод *относительных приростов*, согласно которому нагрузка распределяется так, чтобы дополнительные затраты топлива были минимальны. Независимо от способа решения задачи составляется программа, позволяющая для любого промежутка времени определять состав работающих агрегатов, обеспечивающих минимум суммарных тепловых потерь.

Третьей важной задачей, возлагаемой на АСУ, является *определение оптимальных сроков проведения профилактических ремонтов оборудования электростанции*, что позволяет избежать непроизводительных потерь. Так, если вывести в ремонт оборудование, которое может еще работать, то увеличиваются потери на простои, а если оставить в эксплуатации оборудование, выработавшее свой срок, то это грозит аварией. Кроме того, при решении задачи необходимо учитывать производительность энергоустановки, срок ее службы, время проведения предыдущего ремонта и затраты на обслуживание. Таким образом, необходим единый подход к оценке работоспособности оборудования. Поэтому информацию о режимах работы накапливают в памяти ЭВМ, являющейся составной частью АСУ.

Межремонтные сроки рассчитывают по особой программе. Программа учитывает прибыль как при условии, что ремонт не производится, так и при условии проведения ремонта. Решение о проведении ремонта принимает обслуживающий персонал. При этом ремонт одного из узлов системы может выводить из эксплуатации и другие узлы или механизмы. Поэтому подход к ремонтным работам должен быть комплексным — необходимо отводить на ремонты определенное (оптимальное) время и производить их так, чтобы общее время простоя механизмов было минимальным.

Для оценки работоспособности оборудования в АСУ используют специальные программы диагностики и прогнозирования, составленные с учетом как изменения рабочих характеристик оборудования, так и состояния технологических параметров. Диагностика позволяет также избежать предаварийных и аварийных ситуаций.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены устройства тепловой защиты?
2. Из каких основных элементов формируются цепи защиты?
3. Каковы назначение логических элементов и основные элементарные логические функции?
4. Какие основные виды защит барабанного котла вы знаете?
5. Чем отличается защита прямоточного котла от защиты барабанного?
6. Каковы основные защиты турбин?
7. Для чего предназначена технологическая сигнализация?
8. Что понимается под логическим управлением?
9. Объясните на схеме, как выполняется пуск электродвигателей собственных нужд?
10. Каковы условия работы управляющих вычислительных комплексов?

чего поступает в рабочую камеру измерительного моста *4* газоанализатора. Для контроля расхода анализируемого газа и давления перед приемным устройством устанавливают ротаметр *9*, а за ним жидкостный манометр *2*. Регулировка расхода и давления газа осуществляется дроссельными вентилями *3* и *10*.

Газоанализаторы МН5106 выпускаются с диапазоном измерения кислорода от 0 до 10% и допустимой погрешностью +0,25%, а газоанализаторы МН5180 — с диапазонами измерений кислорода: от 0 до 0,5% и допустимой погрешностью ±19%; от 0 до 1 и от 0 до 2% с погрешностью ±5% и от 0 до 5, от 0 до 10 и от 0 до 21% с погрешностью ±2%. Продолжительность установления теплового режима в приборе составляет не более 1 ч, а показаний прибора при изменении концентрации кислорода — от 1 до 1,5 мин.

§ 46. Тепловые автоматические газоанализаторы

К тепловым газоанализаторам относят приборы, принцип действия которых основан на измерении теплопроводности газовой смеси. Их применяют для определения процентного содержания одного компонента газовой смеси (H_2, CO_2), имеющего коэффициент теплопроводности, резко отличающийся от коэффициентов других компонентов. Это связано с тем, что общая теплопроводность определяется суммой значений теплопроводности λ_i каждого компонента смеси, умноженных на коэффициент массы, равный его концентрации в смеси, т. е. измеряемая газоанализатором теплопроводность $\lambda=\lambda_c C_c+\lambda_и C_и$, где $C_и$ — искомая концентрация определяемого компонента с теплопроводностью $\lambda_и$; C_c — суммарная концентрация неизмеряемых компонентов, имеющих близкие к λ_c значения теплопроводности. Поскольку $C_и+C_c=1$, то искомая концентрация $C_и=(\lambda-\lambda_c)/(\lambda_и-\lambda_c)$. Если среди неизмеряемых компонентов смеси содержится газ, изменение концентрации которого влияет на теплопроводность λ смеси, его необходимо удалить. Кроме того, теплопроводность λ существенно зависит от температуры газа.

В качестве примера рассмотрим измерение концентрации углекислого газа CO_2 в дымовых газах котла. При измерении теплопроводности дымовых газов удаляют из состава смеси H_2, SO_2, H_2O. Другие газы, имеющие близкие по значению теплопроводности λ, на результат измерения не влияют. Водород удаляют дожиганием, серный газ — в фильтре со стальными стружками и водой, стабилизация

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Беляев Г. Б., Кузищин В. Ф., Смирнов Н. И. Технические средства автоматизации в теплоэнергетике.— М.: Энергия, 1982.

Кузнецов Н. Д., Чистяков В. С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам.— М.: Энергия, 1978.

Кузьменко Д. Я. Регулирование и автоматизация паровых котлов.— М.: Энергия, 1978.

Плетнев Г. П. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций.— М.: Энергия, 1986.

Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы.— М.: Энергия, 1978.

Устройства теплотехнических измерений и автоматического управления электростанций / Под ред. Н. Г. Барыковой и др—. М.: Энергия, 1985.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава I. Общие понятия и принципы измерения теплотехнических величин 5

§ 1. Измерение. Понятие о метрологии 5
§ 2. Единицы физических величин. Международная система единиц 7
§ 3. Средства и методы измерений 11
§ 4. Эталоны и поверка рабочих средств измерений . . . 19
§ 5. Погрешности средств измерений 20
§ 6. Метрологические характеристики средств измерений 21
§ 7. Метрологические характеристики информационно-измерительных систем 25

Глава II. Приборы для измерения температур 26

§ 8. Общие сведения 26
§ 9. Средства измерений температуры в теплоэнергетике 28
§ 10. Жидкостные термометры расширения 29
§ 11. Дилатометрические термометры 33
§ 12. Манометрические термометры 34
§ 13. Термоэлектрические термометры 37
§ 14. Термометры сопротивления 45
§ 15. Пирометры 50

Глава III. Измерительные преобразователи для дистанционной передачи показаний и вторичные приборы 52

§ 16. Общие сведения 52
§ 17. Нормирующие измерительные преобразователи 53
§ 18. Дифференциально-трансформаторные преобразователи и схемы дистанционной передачи 57
§ 19. Преобразователи с магнитной компенсацией . . . 60
§ 20. Ферродинамические преобразователи и схемы дистанционной передачи 61
§ 21. Электросиловые преобразователи 65
§ 22. Реостатные измерительные преобразователи и схемы дистанционной передачи 66
§ 23. Пневматические преобразователи и дистанционная передача измерительных сигналов 68
§ 24. Технические характеристики вторичных приборов 71

температуры смеси и содержания воды обеспечивается ее охлаждением в холодильнике до требуемой температуры.

Существует одномостовая схема построения тепловых газоанализаторов (ТКГ, ГЭД, ГЭУК), когда платиновые электросопротивления, через которые проходит анализируемый газ, включены в противоположные плечи моста. Концентрация определяемого компонента CO_2 (или H_2, или SO_2) фиксируется милливольтметром, установленным в диагонали моста.

Во избежание влияния колебаний напряжения питания, температуры окружающей среды в измерительную схему прибора кроме рабочего моста (на который подается анализируемый газ) вводится мост сравнения. Принцип действия и устройство измерительной схемы тепловых газоанализаторов такие же, как и в автоматических газоанализаторах МН-5106 (см. рис. 64, *б*). Газоанализаторы, построенные по этой схеме, применяют на ТЭС для измерения углекислого газа в дымовых газах котлов, водорода в системе охлаждения турбин. Предельная погрешность тепловых газоанализаторов достигает $\pm 2{,}5\%$, а период установления показаний — 1—3 мин.

§ 47. Оптические и электрохимические автоматические газоанализаторы

В оптических газоанализаторах используется свойство газов поглощать электромагнитные колебания в определенной частотной области. Так, например, газы, содержащие два атома и более, поглощают инфракрасное излучение, а одноатомные газы — ультрафиолетовое излучение. Схема прибора инфракрасного излучения для определения содержания CO_2, CO, CH_4 в анализируемом газе состоит из источника излучения, светофильтра, диска с отверстиями для создания пульсаций излучения. Анализируемый газ поглощает излучение, нагревается, при этом возрастает его давление на подвижную мембрану. Мембрана, являющаяся одним из электродов электрической емкости, под действием пульсирующего давления перемещается, в результате чего на выходе прибора возникает электрическое напряжение, пропорциональное измеряемой величине.

В последнее время для измерения микроконцентраций токсичных газов в продуктах сгорания топлива используют электрохимические газоанализаторы, принцип действия которых основан на электрохими-

Глава IV. Методы и средства измерений давления, разности давлений и разрежения 78
§ 25. Общие сведения 78
§ 26. Жидкостные приборы давления 79
§ 27. Приборы измерения давления и разности давлений с упругой деформацией чувствительных элементов 83
§ 28. Электрические манометры 87
§ 29. Методика измерения давления в рабочих условиях 92

Глава V. Приборы измерения расхода пара, жидкости, газа и теплоты 97

§ 30. Общие сведения 97
§ 31. Измерение расхода по перепаду давления на сужающем устройстве 98
§ 32. Методика измерения расхода веществ с помощью сужающих устройств 103
§ 33. Расходомеры постоянного перепада давления . . . 105
§ 34. Тахометрические расходомеры 107
§ 35. Скоростные и объемные счетчики количества жидкости 108
§ 36. Электромагнитные и ультразвуковые расходомеры 109
§ 37. Тепломеры 110

Глава VI. Измерение уровня жидкостей и сыпучих веществ 113

§ 38. Общие сведения 113
§ 39. Водомерные стекла и поплавковые уровнемеры 113
§ 40. Гидростатические уровнемеры 115
§ 41. Емкостные и индуктивные уровнемеры 119
§ 42. Радиоизотопные и акустические уровнемеры . 122
§ 43. Измерение уровня сыпучих тел 123

Глава VII. Анализ состава газов и качества теплоносителя 125

§ 44. Общие сведения 125
§ 45. Автоматические термомагнитные газоанализаторы 126
§ 46. Тепловые автоматические газоанализаторы . . . 129
§ 47. Оптические и электрохимические автоматические газоанализаторы 130
§ 48. Химические газоанализаторы 131
§ 49. Хроматографические газоанализаторы 133
§ 50. Анализ состава жидкостей и паров. Методы анализа растворов 134
§ 51. Эксплуатация приборов, измеряющих состав жидкостей и газов 139

Глава VIII. Оснащение современных котлов измерительными приборами 141

§ 52. Общие сведения 141

ческих явлениях, происходящих в электродных системах, погруженных в фоновый раствор электролита с пропусканием через него анализируемого газа. Электрохимические газоанализаторы разделяют на кулоновские и вольт-амперные.

Принцип действия *кулоновских газоанализаторов* основан на связывании выделившегося при электролизе вещества с анализируемым газом так, что мерой концентрации газа является электрический ток. Кулонометрические газоанализаторы служат для измерения содержания микроконцентраций SO_2, H_2S, Cl_2, O_3.

Принцип действия *вольт-амперных газоанализаторов* основан на явлении деполяризации электрода анализируемым газом, при этом электрический ток в растворе пропорционален концентрации газа. Например, при измерении концентрации O_2 в качестве поляризованного электрода применяют катод, а фоновым электролитом служит раствор кислоты. Кислород, являясь активным деполяризатором, восстанавливается на катоде до перекиси водорода, вызывая прохождение через раствор поляризационного тока, который измеряется миллиамперметром.

§ 48. Химические газоанализаторы

Большое распространение для анализа дымовых газов получили переносные химические газоанализаторы периодического действия, которые могут быть индикаторами и сигнализаторами утечки газов. К приборам этой группы относят объемные электрохимические газоанализаторы. При этом содержание искомого компонента определяют по изменению объема или давления газовой смеси в результате ее сжигания, избирательного поглощения или химической реакции. Этими приборами можно измерить концентрацию в газовой смеси следующих элементов: CO_2, SO_2, H_2S, H_2, CO, O_2. Содержание CO_2 и SO_2 определяют по поглощению их раствором едкого кали, H_2 и CO — щелочным раствором полухлористой меди, O_2 — щелочным раствором пирогаллола, углеводородов — бромной водой. Погрешность рассматриваемого метода зависит от погрешности измерения объема или давления и стабильности температуры начального и остаточного объема взятой пробы газа.

Рассмотрим принцип действия газоанализатора ГХП-2 (рис. 65), предназначенного для измерения CO_2 и O_2. Прибор состоит из измерительной бюретки *3*, к которой через краны *10* подключены два поглотительных сосуда *5*

§ 53. Функции и принципы организации теплотехнического контроля 145
§ 54. Выбор измерительных приборов для системы теплотехнического контроля котлоагрегатов 147
§ 55. Установка приборов и устройств информации на БЩУ 149

§ 56. Развитие методов и средств теплотехнического контроля 152

Глава IX. Основы автоматического регулирования тепловых процессов 154

§ 57. Общие сведения 154
§ 58. Переходные процессы в АСР и характеристики объектов регулирования 157
§ 59. Типовые динамические звенья и их характеристики 161
§ 60. Устойчивость и качество автоматических систем регулирования 165
§ 61. Основные законы регулирования 167
Глава X. Системы управления на тепловых электрических станциях 168

§ 62. Особенности регулирования паровых котлов . . . 168
§ 63. Основные функции управления тепловыми процессами 172
§ 64. Автоматизированные системы управления технологическими процессами на ТЭС 176

Глава XI. Автоматические регуляторы и регулирующие органы 181

§ 65. Общие сведения 181
§ 66. Принцип действия регулятора 185
§ 67. Особенности регулирующей аппаратуры серии «Каскад» 188
§ 68. Измерительный блок И-04 189
§ 69. Регулирующий блок Р-21 190
§ 70. Регулирующий аналоговый блок Р-12 192
§ 71. Особенности регулирующей аппаратуры АКЭСР 193
§ 72. Регулирующие блоки АКЭСР 195
§ 73. Исполнительные механизмы автоматических регуляторов 198
§ 74. Пусковые устройства электрических двигателей исполнительных механизмов 201
§ 75. Регулирующие органы теплоэнергетических установок 203
§ 76. Пневматические регуляторы 207

Глава XII. Автоматическое регулирование теплоэнергетических устаиовок 212

§ 77. Общие сведения 212
§ 78. Автоматическое регулирование барабанных котлов 212
§ 79. Схемы автоматического регулирования прямоточных котлов 223
§ 80. Регулирование вспомогательных установок . . . 227

Глава XIII. Тепловые защиты и блокировки 232

§ 81. Общие сведения 232
§ 82. Тепловые защиты барабанных и прямоточных котлов 235
§ 83. Технологическне защиты турбины и вспомогательного оборудования 240
§ 84. Устройство и назначение технологической сигнализации 243
§ 85. Схема управления электродвигателями собственных нужд 244
§ 86. Особенности монтажа, эксплуатации и обслуживания средств автоматизации 245
Рекомендуемая литература 252

Учебное издание

Мухин Виктор Степанович
Саков Игорь Алексеевич

ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И СРЕДСТВА АВТОМАТИКИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Зав. редакцией С. В. Никитина. Редактор М. В. Золоева. Мл. редактор Л. Е. Чеканская. Художник С. В. Аладьев. Художественный редактор В. П. Бабикова. Технический редактор Е. И. Герасимова. Корректор Г. А. Чеченкина

ИБ № 6925

Изд. № ЭГ-181. Сдано в набор 02.02.88. Подп. в печать 04.07.88. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 13,44 усл. печ. л. 13,65 усл. кр.-отт. 13,63 уч.-изд. л. Тираж 32 000 экз. Зак. № 187. Цена 35 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Отпечатано с матриц Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054, Москва, Валовая, 28 во Владимирской типографии Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7.

и *6*. Сосуд *6* заполнен раствором едкого кали (для поглощения CO_2), а сосуд *5* — раствором пирогаллола (для поглощения O_2). Поскольку в сосуде *5* кроме кислорода поглощается и диоксид углерода, проба газа сначала поступает в сосуд *6*, а затем — в сосуд *5*. В бюретке находится жидкостный манометр *4*, одна трубка которого сообщается с атмосферой. Манометр служит для измерения давления газа после поглощения определяемого компонента. Бюретка термостатирована. Пробу газа с помощью груши *8* отбирают в сосуд *2* через фильтр *9* (для очистки газа). При опускании

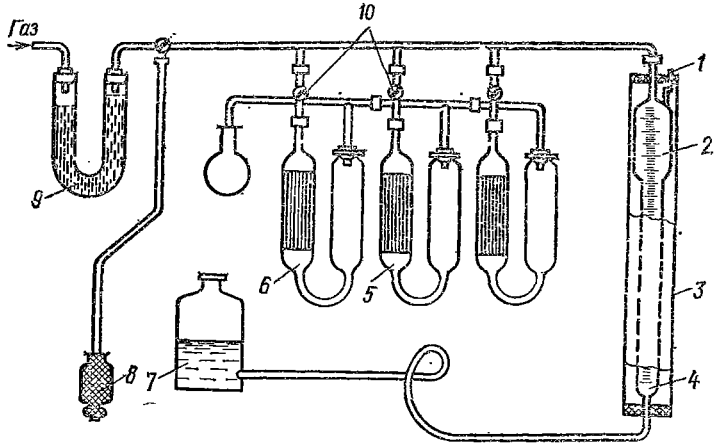


Рис. 65. Схема химического переносного газоанализатора ГХП: *1* — трубка, *2*, *5*, *6*, *7* — сосуды, *3* — бюретка, *4* — манометр, *8* — груша, *9* — фильтр, *10* — кран

напорного сосуда *7* бюретка заполняется газом, избыток которого удаляют через трубку *1*. При подъеме сосуда *7* его жидкость достигает конца трубки *1*, в результате чего перекрывается вывод газа в атмосферу (при этом отсекается проба газа 50 см³). Далее один из кранов *10* переключают в другое положение, при котором анализируемый газ сначала поступает в сосуд *6*, а затем в сосуд *5*. После прохождения газа через каждый сосуд определяют изменение его объема, по которому судят о концентрации измеряемого компонента газа. Недостатками электрохимических газоанализаторов, затрудняющими их применение на ТЭС, являются периодичность анализа, необходимость частой замены реактивов, сложность создания автоматического прибора.