

СПРАВОЧНИК

В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ

Б. И. ПАНЕВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ



МОСКВА ВО «АГРОПРОМИЗДАТ» 1987

ББК 40.76

П 16

УДК 631.171:621.317(031)

Рецензенты: канд. техн. наук *Р. Г. Агаев* (ВИЭСХ) и инженер *В. И. Галинский* (Госагропром СССР).

Панев Б. И.

П 16 **Электрические измерения: Справочник (в вопросах и ответах).**— М.: Агропромиздат, 1987.— 224 с.: ил.

В справочнике приведены сведения о средствах и методах измерения электрических и неэлектрических величин в сельскохозяйственном производстве.

Предназначен для специалистов, инженерно-технических работников АПК, имеющих дело с электрическими измерениями. Может быть полезен для студентов факультетов электрификации сельского хозяйства.

П $\frac{3802040200-405}{035(01)-87}$ 164-87

ББК 40.76

Задачи по реализации Продовольственной программы СССР, поставленные перед работниками сельского хозяйства XXVII съездом КПСС и советским правительством, требуют резкого повышения производства продуктов питания и сельскохозяйственного сырья главным образом за счет интенсивных факторов развития, внедрения новейших достижений науки, техники и передовой практики, эффективного использования созданного производственного потенциала. Широкое внедрение новой техники в сельское хозяйство обуславливает повышенные требования к квалификации специалистов агропромышленного комплекса. Каждый технологический процесс в сельском хозяйстве характеризуется рядом параметров (температурой, влажностью, расходом, давлением, уровнем, количеством веществ, их составом и свойствами, электрическими напряжением и силой тока, мощностью, частотой и т. п.), которые для обеспечения заданного качества продукции должны изменяться только в определенных пределах. Следовательно, параметры как самого технологического процесса, так и продукции необходимо контролировать, то есть измерять.

Внедрение автоматики в технологические процессы предъявляет повышенные требования к точности, достоверности и сопоставимости результатов измерений, увеличивает число величин, подлежащих измерению, в том числе незлектрических.

В сельском хозяйстве измерения применяются также при учете продукции сельского хозяйства в процессе ее производства, транспортирования, хранения и переработки. Однако следует отметить, что во многих отраслях сельского хозяйства измерения вообще не проводятся или точность измерений невысока. Это препятствует выпуску высококачественной продукции, наносит сельскому хозяйству большой урон. Например, погрешность в измерении влажности зерна, равная 1 %, вызывает неточности в определении его годовой стоимости в 60 млн. руб. Стоимость перевозки 1 % излишней влаги в зерне, хлопке, минеральных удобрениях составляет 55 млн руб. в год.

Исключительно велика роль измерений в повышении качества продукции сельского хозяйства. Например, активный контроль температуры и влажности в хранилищах снижает потери зерна на 1. . . 3 %, картофеля — на 6. . . 16 %, капусты — на 20 %. Измерение параметров микроклимата в теплицах и их регулирование позволяют поднять урожайность овощей на 10. . . 15 %, снизить расходы теплоты на 10. . . 15 % при повышении производительности труда на 15 %.

С каждым днем сельское хозяйство оснащается все более сложным оборудованием, разнообразными измерительными приборами, а специалистов по метрологии в самих хозяйствах пока что нет. Поэтому для успешной работы специалисты агропромышленного комплекса нуждаются в простейшей литературе, в которой на доступных примерах объяснялись бы принципы действия основных средств измерений, методы измерения как электрических, так и незлектрических величин.

Предлагаемый читателям справочник по электрическим измерениям предназначен для широкого круга инженерно-технических работников агропромышленного комплекса. Задача настоящей книги — помочь специалистам агропромышленного комплекса овладеть основами электрических измерений, ознакомиться с основными понятиями электроизмерительной техники, принципом действия и основными характеристиками современных средств измерений и методами измерения электрических и неэлектрических величин.

Выбранный автором способ изложения материала (вопросы и ответы) дает возможность читателю быстро изучить принцип действия нужного прибора и освоить методику его применения. В связи с этим отдельные главы изложены таким образом, чтобы их можно было изучать независимо от других.

В первой части справочника приведен минимум теоретических сведений об устройстве и принципе действия приборов различных измерительных систем, который необходим для практической работы. Во второй и третьей частях книги рассмотрены методы измерения электрических и неэлектрических величин. В последней главе приведены основные сведения по обработке результатов измерений с использованием микрокалькуляторов.

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Что такое средство измерений?

Техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства, называется **средством измерений**.

По назначению средства измерений делят на образцовые и рабочие, причем по конструкции и метрологическим характеристикам они могут быть аналогичны.

Образцовые средства измерений запрещается применять для практических измерений, они предназначены для поверки по ним других средств измерений — как рабочих, так и образцовых более низкой точности.

Рабочие средства измерений есть средства, применяемые для измерений, не связанных с передачей размеров единиц физических величин.

Быть уверенным в правильности показаний рабочего средства измерений можно, только поверив его при помощи более точного образцового средства измерений. **Поверку** средства измерений, то есть определение погрешностей средства измерений и установление его пригодности к применению, проводят только органы метрологической службы, имеющие соответствующее разрешение.

К средствам измерений относятся меры, измерительные приборы, преобразователи, установки и системы, измерительные принадлежности.

Мера есть средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Мера, воспроизводящая физическую величину одного размера, называется **однозначной**, а воспроизводящая ряд одноименных величин различного размера — **многозначной**. Примеры однозначной меры — нормальный элемент (мера ЭДС), образцовая катушка (мера сопротивления), а многозначной — миллиметровая линейка, вариометр индуктивности, конденсатор переменной емкости, магазин сопротивлений.

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

Преобразователи по месту, занимаемому в измерительной цепи, делятся на **первичные, передающие и промежуточные**. На вход первичного преобразователя воздействует непосредственно измеряемая величина, а промежуточный занимает в измерительной цепи место после первичного. Передающий преобразователь служит

для дистанционной передачи измерительной информации и может быть в то же время первичным.

Для того чтобы изменить в определенное число раз значение одной из величин, действующих в измерительной цепи, без изменения ее физической природы, используют масштабные преобразователи (измерительные трансформаторы тока, усилители и т. п.).

Для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, предназначен измерительный прибор. Последний состоит из ряда измерительных преобразователей, каналов связи, согласующих элементов, измерительного механизма, в совокупности образующих измерительную цепь. По способу образования показаний измерительные приборы делят на показывающие и регистрирующие.

Показывающий прибор допускает только отсчитывание показаний. Отсчитывают показания визуально по шкале средства измерений, относительно которой перемещается указатель отсчетного устройства, или по светящимся цифрам, возникающим на отсчетном устройстве в цифровых показывающих приборах.

Регистрирующий прибор содержит механизм регистрации показаний. Если в приборе предусмотрена запись показаний в форме диаграмм, то его называют самопишущим.

Измерительная установка представляет собой совокупность функционально объединенных средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателя, и расположенных в одном месте. В качестве примера можно привести измерительные установки для поверки нормальных элементов.

Измерительная система в отличие от измерительной установки предназначена для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и использования в автоматической системе управления.

1.2. Какие параметры и свойства средств измерений следует учитывать при их выборе?

При выборе средства измерений следует учитывать его погрешность, градуировочную характеристику, чувствительность, пределы и диапазон измерений, нормальные условия применения.

Градуировочной характеристикой средства измерений называется зависимость между значениями величины на выходе и входе средства измерений, составленная в виде таблицы, графика или формулы.

Чувствительность измерительного прибора равна отношению изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины. Чем чувствительней прибор, тем меньшие изменения измеряемой величины он будет отмечать и тем большие возможности для измерений высокой точности он обеспечивает.

Различают абсолютную и относительную чувствительность. Абсолютная чувствительность определяется формулой

$$S = \Delta I / \Delta x,$$

где ΔI — изменение сигнала на выходе; Δx — изменение измеряемой величины.

Относительная чувствительность определяется формулой

$$S_0 = \Delta I / (\Delta x / x),$$

где x — измеряемая величина.

Изменение измеряемой величины, вызывающее наименьшее перемещение его указателя, которое можно заметить при нормальном для прибора способе отсчета, называется **порогом чувствительности**.

При выборе прибора обращают внимание на предел измерений, то есть наименьшее и наибольшее значения измеряемой величины, которые могут быть измерены данным прибором. Область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средства измерений, определяет диапазон измерений. Диапазон измерений указывают в виде записи, например 0—50 А, 5—10—100 Ом, где 0 А, 10 Ом — нижний предел измерений, обеспечивающий допускаемые погрешности. В некоторых случаях, когда нижний предел измерений, указанный на шкале приборов, равен 0, но точность измерения малых значений низка, за нижнюю границу диапазона измерений принимают некоторое значение, составляющее 20...30 % верхнего предела измерений.

При выборе прибора следует учитывать условия, в которых работает средство измерений, так как они существенно влияют на его показания. Прежде всего это такие влияющие величины, как температура окружающей среды, влажность, атмосферное давление, напряжение сети, диапазон частот и др.

Нормальные значения влияющих величин установлены ГОСТ 22261—82: температура окружающего воздуха 20 °С, относительная влажность окружающего воздуха 30...80 %, атмосферное давление 8...106 кПа, или 630...795 мм рт. ст., частота питающей сети $50 \pm \pm 0,5$ Гц, напряжение питающей сети $220 \pm 4,4$ В и т. п.

Например, если указано, что средство измерений рассчитано на диапазон температур от +10 до +35 °С, то это означает, что погрешность прибора и другие его характеристики в пределах этого диапазона нормированы.

Кроме рабочих условий применения средств измерений, при которых значения влияющих величин находятся в пределах рабочих областей, указываются предельные значения температур, предельные условия транспортирования и хранения.

1.3. Какие бывают погрешности средства измерений?

Качество средств измерений принято характеризовать указанием их погрешностей. Погрешность прибора характеризует отклонения показаний прибора от истинных значений измеряемой величины, возникающие при изготовлении и эксплуатации средства измерений.

Близость к нулю погрешностей прибора характеризует качество средства измерений, называемое **точностью измерений**.

Разность между показанием прибора $x_{п}$ и действительным значением измеряемой величины $x_{д}$ называют **абсолютной погреш-**

ностью измерительного прибора Δx :

$$\Delta x = x_n - x_d \quad (1.1)$$

Однако по значению абсолютной погрешности трудно судить о точности измерения. Так, например, $\Delta x = 0,05$ А при $x = 100$ А соответствует высокой точности, а при $x = 1$ А — низкой. Поэтому вводится понятие **относительной погрешности** δ , то есть отношение абсолютной погрешности прибора к истинному значению измеряемой величины x :

$$\delta = \Delta x / x, \text{ или, в процентах, } \delta = (\Delta x / x_n) \cdot 100. \quad (1.2)$$

Но эта характеристика непригодна для нормирования погрешности средства измерений, так как при $x = 0$ $\delta = \infty$. Поэтому для указания и нормирования погрешности средства измерений используют **приведенную погрешность**, то есть отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению прибора x_n , последнее может быть равно верхнему пределу измерений, диапазону измерений, длине шкалы:

$$\delta_{\text{пр}} = \Delta x / x_n. \quad (1.3)$$

Точность ряда средств измерений с различными диапазонами измерений можно сопоставлять только по приведенным погрешностям.

При нормальных условиях средство измерений имеет **основную погрешность**. Вследствие отклонения одной или нескольких влияющих величин от нормального их значения возникают **дополнительные погрешности**.

Погрешности средства измерений могут иметь как систематические, так и случайные составляющие. **Систематическая погрешность** — это такая составляющая погрешности, которая остается постоянной или закономерно изменяется. Систематическую погрешность находят при поверке и аттестации образцовых приборов, например изменением наперед заданных значений измеряемой величины в нескольких точках шкалы. Затем строят кривую или создают таблицу погрешностей, которую и используют для определения поправок.

Случайная погрешность — это составляющая погрешности, которая изменяется случайным образом. Случайные погрешности легко обнаружить при повторных измерениях в виде некоторого разброса получаемых результатов.

Когда средство измерений используют для измерения постоянной во времени величины, для его характеристики пользуются понятием **статической погрешности**, а для измерения переменной во времени величины — понятием **динамической погрешности**.

Систематическая, случайная, статическая и динамическая погрешности могут быть как абсолютными, так и относительными.


1.4. Какие условные обозначения наносят на электроизмерительные приборы!

Согласно ГОСТ 23217—78, для электроизмерительных аналоговых приборов с непосредственным отсчетом установлены следующие условные обозначения, наносимые на них,

А. Основные единицы измерения и их кратные и дольные значения: килоампер — kA, ампер — A, миллиампер — mA, микроампер — μ A, киловольт — kV, вольт — V, милливольт — mV, мегаватт — MW, киловатт — kW, ватт — W, мегавар — Mvar, киловар — kvar, вар — var, мегагерц — MHz, килогерц — kHz, Герц — Hz, мегом — M Ω , килоом — k Ω , ом — Ω , тесла — T, миллитесла — mT, градус Цельсия — $^{\circ}$ C.







Б. Род тока: постоянный, обозначается знаком —, переменный \sim , постоянный и переменный \approx , трехфазный \approx .

В. Безопасность. Внутри пятиконечной звездочки указана цифра испытательного напряжения в киловольтах. Если стоит цифра 0, то это означает, что прибор испытанию прочности изоляции не подлежит. Если внутри звездочки не указана цифра, то это означает, что испытательное напряжение равно 500 В, а если указана, то она соответствует числовому значению испытательного напряжения в киловольтах.

Г. Используемое положение. Прибор применять при вертикальном положении шкалы — \perp ; прибор применять при горизонтальном положении шкалы — Γ ; прибор применять при наклонном положении (под углом, например, 60 $^{\circ}$) — $\angle 60^{\circ}$; прибор должен ориентироваться в направлении внешнего магнитного поля — .

Д. Класс точности. Класс точности указывают на приборе соответствующей цифрой, например 0,5, 1,0, 1,5 и т. д.

Е. Общие условные обозначения принципа действия электроизмерительных приборов

Электроизмерительный прибор	Условное обозначение
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Логометр магнитоэлектрический	
Прибор электромагнитный	
Логометр электромагнитный	
Прибор электродинамический	
Логометр электродинамический	

Электронизмерительный прибор

Условное
обозначение

Прибор ферродинамический



Прибор индукционный



Логометр индукционный



Прибор электростатический

Прибор магнитоэлектрический с выпрямителем
(выпрямительный прибор)Прибор магнитоэлектрический с электронным преобразователем
(электронный прибор)Прибор магнитоэлектрический с неизолированным термопреобразователем
(термоэлектрический прибор)Прибор магнитоэлектрический с изолированным термопреобразователем
(термоэлектрический прибор)

1.5. Что означает класс точности прибора?

Класс точности средства измерений — это обобщенная характеристика, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами, влияющими на точность, значения которых установлены в стандартах на отдельные виды средств измерений. Класс точности средств измерений характеризует их свойства в отношении точности, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых при помощи этих средств.

Для того чтобы заранее оценить погрешность, которую внесет данное средство измерений в результат, пользуются нормированными значениями погрешности. Под ними понимают предельные для данного типа средства измерений погрешности. Погрешности отдельных приборов данного типа могут быть различными, иметь отличающиеся друг от друга систематические и случайные составляющие, но в целом погрешность данного прибора не должна превосходить нормированного значения. Границы основной погрешности и коэффициентов влияния заносят в паспорт каждого прибора.

Основные способы нормирования допускаемых погрешностей и

обозначения классов точности средств измерений установлены ГОСТ 8.401—80.

На шкале прибора маркируют значение класса точности прибора в виде числа, указывающего нормированное значение погрешности. Выраженное в процентах, оно может иметь значения 6; 4; 2,5; 1,5; 1,0; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05; 0,02; 0,01; 0,005; 0,002; 0,001 и т. д.

Если обозначаемое на шкале значение класса точности обведено кружком, например 1,5, это означает, что погрешность чувствительности $\delta_S = 1,5\%$. Так нормируют погрешности масштабных преобразователей (делителей напряжения, шунтов, измерительных трансформаторов тока и напряжения и т. п.).

Это означает, что для данного прибора погрешность чувствительности $\delta_S = \Delta x/x$ — постоянная величина при любом значении x . Граница относительной погрешности $\delta(x)$ постоянна и при любом значении x просто равна значению δ_S , а абсолютная погрешность результата измерений определяется как $\Delta x = \delta_S x$.

Для таких приборов всегда указывают границы рабочего диапазона, в которых такая оценка справедлива.

Если на шкале прибора цифра класса точности не подчеркнута, например 0,5, это означает, что прибор нормируется приведенной погрешностью нуля $\delta_0 = 0,5\%$. У таких приборов для любых значений x граница абсолютной погрешности нуля $\Delta x = \Delta_0 = \text{const}$, а $\delta_0 = \Delta_0/x_N$.

При равномерной или степенной шкале прибора и нулевой отметке на краю шкалы или вне ее за x_N принимают верхний предел диапазона измерений. Если нулевая отметка находится посередине шкалы, то x_N равно протяженности диапазона измерений, например для миллиамперметра со шкалой от -3 до $+3$ мА, $x_N = = 3 - (-3) = 6$ А.

Однако будет грубейшей ошибкой полагать, что амперметр класса точности 0,5 обеспечивает во всем диапазоне измерений погрешность результатов измерений $\pm 0,5\%$. Из (1.2) следует, что значение погрешности δ_0 увеличивается обратно пропорционально x , то есть относительная погрешность $\delta(x)$ равна классу точности прибора лишь на последней отметке шкалы (при $x = x_K$). При $x = = 0,1 x_K$ она в 10 раз больше класса точности. При приближении x к нулю $\delta(x)$ стремится к бесконечности, то есть такими приборами делать измерения в начальной части шкалы недопустимо.

На приборах с резко неравномерной шкалой (например на омметрах) класс точности указывают в долях от длины шкалы и обозначают как 1,5 с обозначением ниже цифр знака «угол».

Если обозначение класса точности на шкале прибора дано в виде дроби (например 0,02/0,01), это указывает на то, что приведенная погрешность в конце диапазона измерений $\delta_{пр.к} = \pm 0,02\%$, а в нуле диапазона $\delta_{пр.н} = \pm 0,01\%$. К таким приборам относятся высокоточные цифровые вольтметры, потенциометры постоянного тока и другие высокоточные приборы. В этом случае

$$\delta(x) = \delta_K + \delta_N (x_K/x - 1),$$

где x_K — верхний предел измерений (конечное значение шкалы прибора); x — измеряемое значение.

1.6. Какие требования техники безопасности предъявляются к электроизмерительным приборам?

Согласно ГОСТ 22261—82, к средствам измерений предъявляются следующие основные требования.

Все внешние части средств измерений, находящиеся под напряжением, превышающим 32 В по отношению к корпусу, должны быть защищены от случайных прикосновений к ним во время работы, то есть иметь клеммы с изоляционными головками, утопленные гнезда, защитные кожухи и т. п.

Средства измерений с электропитанием от сети необходимо оборудовать световой индикацией включения сетевого выключателя.

В цепи питания средств измерений должен быть плавкий предохранитель. Значение силы тока указывают на держателе предохранителя или возле него.

В процессе эксплуатации электроизмерительных приборов необходимо следить за тем, чтобы обслуживающий персонал имел соответствующую квалификационную группу, был хорошо знаком с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

Все токоведущие части, находящиеся под напряжением, должны быть защищены, хорошо изолированы, а если требуется, то заземлены. Электроизмерительные приборы необходимо периодически подвергать испытанию на электрическую прочность изоляции и, если она перестала соответствовать требуемым нормам, на приборе следует нанести отметку в виде красной стрелки.

При работе с измерительными трансформаторами тока нужно следить за тем, чтобы вторичная обмотка при включенной первичной не оказалась разомкнутой, так как это связано с появлением большой ЭДС на зажимах вторичной обмотки и со значительным перегревом сердечника трансформатора, что ухудшает изоляцию. При подключении трансформаторов напряжения надо устанавливать на первичной стороне соответствующие плавкие предохранители.

При работе с электроизмерительными приборами надо помнить, что даже пониженное напряжение 12...36 В может оказаться опасным, так как ток в одну сотую ампера может привести к смертельному исходу. Сопротивление тела человека непостоянно, зависит от многих факторов (состояние кожи, влажность, самочувствие и т. п.) и изменяется порой от 10 до 100 кОм, поэтому в момент, когда сопротивление тела человека уменьшается до минимальных значений, даже допустимое напряжение может оказаться опасным.

При несчастном случае на электрической установке необходимо немедленно начать оказывать помощь пострадавшему, не прекращая ее до прибытия врача, даже если это потребует сделать несколько часов. Известны случаи, когда после нескольких часов искусственного дыхания и массажа сердца восстанавливались дыхание и работа сердца.

2.1. Как устроен магнитоэлектрический прибор

Различают магнитоэлектрические приборы с подвижной рамкой и подвижным магнитом. Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой имеет постоянный магнит 1 (рис. 2.1, а) с полюсными наконечниками 3. Форма магнита может быть разнообразной. Радиус закругления полюсных наконечников выбран таким, чтобы в воздушном зазоре между ними и подвижным стальным цилиндром 2 получилась равномерная плотность магнитного потока или постоян-

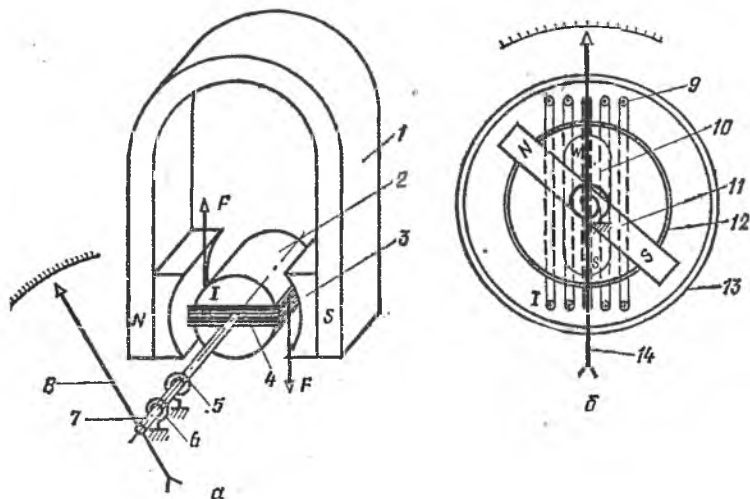


Рис. 2.1. Магнитоэлектрический измерительный механизм: а — с подвижной рамкой; б — с подвижным магнитом.

ная магнитная индукция. Вокруг неподвижного стального цилиндра 2 может поворачиваться алюминиевый каркас, на который намотана катушка 4 из тонкой проволоки. Один ее конец присоединен к одной спиральной пружине 5, а второй — к другой пружине 6. Через эти пружины подается в рамку измеряемый ток. Вместе с каркасом и рамкой может поворачиваться ось 7, а следовательно, и указательная стрелка 8. В приборах, у которых катушка намотана на алюминиевый каркас, последний выполняет роль электромагнитного успокоителя.

Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом имеет катушку 9 (рис. 2.1, б), намотанную обычно из толстой проволоки (на рисунке показана в разрезе). Внутри нее укреплен подвижный магнит 10, который при отсутствии тока в катушке располагается вдоль неподвижного магнита 11. Для создания успокаивающего момента установлен стакан 12 из ферромагнитного материала. Магнитный экран 13 служит для защиты прибора от влияния внеш-

них магнитных полей. На оси подвижного магнита закреплена указательная стрелка 14.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы используют в амперметрах, вольтметрах и гальванометрах, а также в некоторых типах омметров.

2.2. Как работает магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой?

В магнитоэлектрическом приборе с подвижной рамкой измеряемый ток I пропускается через рамку. Проводники с током оказываются в магнитном поле, на каждый проводник начинает действовать сила, значение которой можно определить по формуле

$$F = BI l,$$

где B — магнитная индукция в зазоре; l — длина проводника (т. е. длина той части катушки, которая находится в магнитном поле).

Если в рамке имеется ω витков, то общая сила, действующая на одну сторону рамки, в ω раз больше, то есть

$$F = BI l \omega.$$

В результате действия этих сил относительно оси рамки создается вращающий момент

$$M_{вр} = Fa = BI l \omega a.$$

Под действием этого момента рамка, а вместе с ней и стрелка поворачиваются в направлении действия силы. При повороте рамки происходит закручивание спиральных пружинок на угол α и создается противодействующий момент

$$M_{пр} = \alpha W,$$

где W — удельный противодействующий момент пружинок.

Вся система поворачивается до тех пор, пока вращающий момент не уравновесится противодействующим моментом, тогда

$$BI l \omega a = \alpha W,$$

отсюда можно получить уравнение шкалы прибора

$$\alpha = BI l \omega a / W = SI. \quad (2.1)$$

Величина S для данного прибора постоянная и называется чувствительностью прибора. Она показывает, на какой угол отклоняется стрелка при изменении силы тока на единицу.

Значение угла α пропорционально силе измеряемого тока, то есть шкала у магнитоэлектрического прибора равномерная.

Из уравнения шкалы прибора также следует, что прибором можно измерять только постоянный ток, так как при переменном токе создаются то положительный, то отрицательный моменты, а поскольку стрелка обладает определенной инерцией, то она остается на месте.

Так как ток, проходящий по рамке, зависит от приложенного напряжения, то при постоянном сопротивлении рамки угол откло-

нения стрелки пропорционален напряжению, и, следовательно, при соответствующей градуировке шкалы прибора им можно измерять постоянное напряжение.

2.3. Какие достоинства и недостатки имеют магнитоэлектрические приборы?

Из уравнения (2.1) шкалы магнитоэлектрического прибора видно, что угол отклонения стрелки прибора пропорционален силе тока, протекающего по его рамке при подаче на нее напряжения, поэтому шкала прибора линейная, то есть равномерная. Это одно из достоинств прибора, так как градуировать такую шкалу значительно легче, чем нелинейную. Чувствительность такого прибора остается практически величиной постоянной во всем диапазоне измерений.

Магнитоэлектрические приборы имеют сильное собственное магнитное поле, поэтому не подвергаются влиянию внешних магнитных полей. Кроме того, довольно большой вращающий момент приборов позволяет применять их для изготовления самопишущих приборов.

Магнитоэлектрические приборы потребляют малые токи (значение тока ограничивается допустимым значением, которое могут пропустить спиральные пружинки) и относятся к приборам с малыми собственными потерями.

К достоинствам этих приборов можно отнести и то, что они могут иметь очень большую чувствительность, а поэтому ими можно измерять очень малые токи и напряжения, они могут выполнять роль нулевых указателей в мостах и потенциометрах, светолучевых осциллографах.

Недостатки магнитоэлектрических приборов таковы: они имеют сложную конструкцию, дорого стоят, не рассчитаны на перегрузки, работают только в цепях постоянного тока. Последний недостаток можно устранить, применив выпрямительные устройства или различные преобразователи, например термоэлектрические.

Применяя внутренние и внешние шунты, магнитоэлектрические приборы используют и для измерения больших постоянных токов, достигающих тысячи ампер, а применяя различные дополнительные сопротивления, ими измеряют и большие напряжения.

2.4. Что такое гальванометры, где их применяют?

Гальванометр — высокочувствительный прибор, то есть прибор, который может уловить очень малые изменения какой-то величины (обычно тока или напряжения).

У магнитоэлектрического гальванометра чувствительность S повышена за счет значительного уменьшения удельного противодействующего момента W , для чего подвижную систему (рамку прибора) устанавливают на растяжках (рис. 2.2, а) или на подвеске (рис. 2.2, б). Поскольку растяжки и подвески выполнены из тонких проволочек, то они создают очень маленький удельный противодействующий момент, следовательно, такой прибор имеет высокую чувствительность. Кроме того, в гальванометрах стремятся устанавливать постоянные магниты с наибольшей магнитной индук-

цией B , что также повышает чувствительность прибора. В большинстве гальванометров применяют оптическую систему отсчета, позволяющую за счет удаления шкалы увеличивать размер «стрелки» прибора до 1...2 м (рис. 2.2, в) и более, при этом даже малый угол поворота подвижной системы вызывает значительное отклонение конца «стрелки», то есть и этим приемом увеличивают чувствительность гальванометров.

Некоторые гальванометры специально выполняют так, чтобы получить большой период колебаний рамки прибора. Для этого на подвижной системе гальванометра устанавливают дополнительные грузики. Такие гальванометры называют баллистическими. Для них

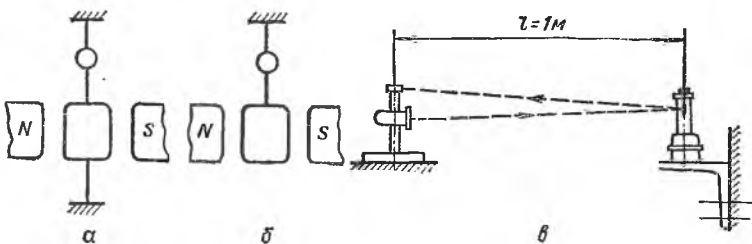


Рис. 2.2. Схемы установки рамок гальванометра (а — на растяжках, б — на подвеске) и гальванометра с объективным отсчетом (в).

характерно то, что угол отклонения стрелки указателя зависит от количества электричества Q , прошедшего через рамку прибора, то есть

$$\alpha = S_6 Q,$$

где S_6 — баллистическая чувствительность гальванометра.

Гальванометры применяют при измерении очень малых напряжений или токов. Однако самое широкое применение они нашли как нуль-индикаторы, то есть как указатели нуля, указатели отсутствия тока или напряжения в той или иной цепи. Например, в любом мосте постоянного тока, потенциометре постоянного тока применяется гальванометр.

2.5. В чем заключается особенность магнитоэлектрических логометров!

Кроме обычных магнитоэлектрических приборов с одной рамкой, широко применяются так называемые магнитоэлектрические логометры, имеющие две подвижные катушки, расположенные под определенным углом одна к другой и имеющие общую ось. В этом приборе нет пружинок для подачи тока и создания противодействующего момента. Питание в подвижные катушки подается через тонкие ленточки, не создающие противодействующего момента (рис. 2.3).

Катушки подключают так, что при пропускании через них токов I_1 и I_2 создаются два противоположно направленных момента M_1 и M_2 . Известно, что моменты у обычных магнитоэлектрических

приборов зависят от токов, протекающих по катушкам. В этом приборе моменты зависят еще и от расположения рамок в магнитном поле воздушного зазора между полюсными наконечниками и неподвижным сердечником. С этой целью радиус полюсных наконечников 1 (рис. 2.3, а) или форма неподвижного сердечника 2 (рис. 2.3, б) подобраны так, что магнитная индукция в зазоре не постоянна, а изменяется по закону синуса, под серединой полюсов она максимальна, а далее уменьшается с увеличением угла α . Следовательно,

$$M_1 = k_1 I_1 f_1(\alpha) \text{ и } M_2 = k_2 I_2 f_2(\alpha).$$

При неравенстве моментов подвижная система начинает поворачиваться в сторону действия большего вращающего момента.

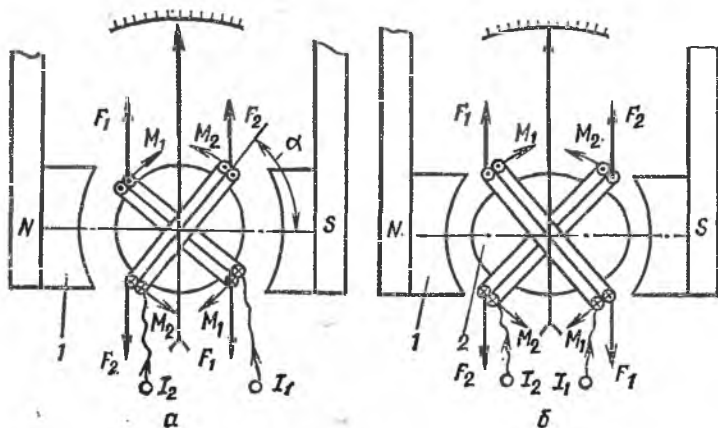


Рис. 2.3. Магнитоэлектрический логометрический механизм.

Допустим, что сила F_1 больше силы F_2 , следовательно, момент M_1 будет больше момента M_2 , и система, а вместе с ней и стрелка прибора начнут отклоняться по часовой стрелке. При этом рамка с током I_1 начнет удаляться от середины полюсов, а рамка с меньшим током I_2 приблизится к середине полюсов. Это приведет к тому, что рамка с током I_1 окажется в магнитном поле с меньшей индукцией B , поэтому сила $F_1 = B_1 I_1 l \omega$, действующая на рамку, уменьшится, уменьшится и вращающий момент M_1 .

Рамка с меньшим током I_2 начнет перемещаться в магнитное поле с большей индукцией, следовательно, сила F_2 увеличится, и M_2 тоже будет увеличиваться до тех пор, пока вращающие моменты M_1 и M_2 не сравняются. При остановке стрелки наступает равенство моментов M_1 и M_2 , или $k_1 I_1 f_1(\alpha) = k_2 I_2 f_2(\alpha)$, откуда можно записать: $f_1(\alpha) = k I_2 / I_1$. Это значит, что каждому отношению токов в рамках соответствует вполне определенный угол отклонения стрелки прибора.

3.1. Как устроены электромагнитные приборы?

Электромагнитный прибор имеет электромагнитный измерительный механизм с неподвижной катушкой, по обмотке которой протекает измерительный ток, и один или несколько ферромагнитных сердечников, установленных на оси.

Электромагнитные приборы изготавливают либо с плоской, либо с круглой катушкой. Плоскую неподвижную катушку (рис. 3.1, а) наматывают обычно из толстой проволоки 1 на неферромагнитный каркас 2 так, что внутри нее образуется воздушный зазор. Рядом с зазором располагают ферромагнитную пластинку 7, ось пластинки

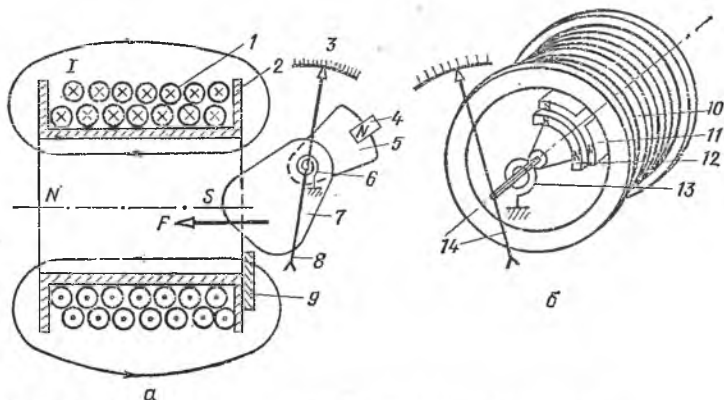


Рис. 3.1. Электромагнитный измерительный механизм:

а — с плоской катушкой; б — с круглой катушкой.

расположена асимметрично, на оси крепят стрелку 8 прибора, перемещающуюся вдоль шкалы 3 прибора. На оси укреплены противодействующая пружина 6 и алюминиевый сектор 5, который может поворачиваться в поле постоянного магнита 4.

Электромагнитный прибор с круглой катушкой устроен следующим образом. Из толстой проволоки намотана круглая катушка 10 (рис. 3.1, б) с воздушным центральным зазором. Внутри зазора неподвижно расположена ферромагнитная пластина 11, а на оси закреплена вторая, но уже подвижная ферромагнитная пластина 12. На оси пластины 12 закреплены противодействующая пружинка 13 и стрелка 14 прибора. Для создания противодействующего момента закрепляют на оси алюминиевый сектор и устанавливают постоянный магнит — на рисунке не показаны.

3.2. Как работают электромагнитные приборы?

Электромагнитный прибор с плоской катушкой работает следующим образом. По катушке пропускают измеряемый ток I , который создает в катушке намагничивающую силу $I\omega$ и магнитный

поток Φ . Этот поток увлекает внутрь катушки ферромагнитную пластинку 7 (рис. 3.1, а). При этом действующая на нее сила F пропорциональна квадрату магнитной индукции B , возникающей в катушке.

Сила F , стремясь втянуть сердечник 7, вызывает его поворот относительно оси, вместе с осью поворачивается стрелка 8 прибора. Поворот стрелки и оси будет происходить до тех пор, пока вращающий момент, создаваемый силой F и равный $M_{вр} = Fb$, не уравновесится противодействующим моментом, создаваемым спиральной пружиной.

Уравнение шкалы электромагнитного прибора имеет вид

$$\alpha = \frac{kb}{W} \left(\mu_0 \frac{I\omega}{l} \right)^2 = \left(\frac{k b \mu_0^2 \omega^2}{W l^2} \right) I^2 = A I^2, \quad (3.1)$$

где W — удельный противодействующий момент, создаваемый спиральной пружиной; μ_0 — магнитная проницаемость среды, находящейся внутри катушки; l — длина катушки; A — постоянная величина для данного прибора.

То есть угол отклонения стрелки прибора зависит от квадрата тока. Таким прибором можно измерять как постоянный, так и переменный ток. Электромагнитные измерительные механизмы используют в амперметрах, вольтметрах, фазометрах и частотомерах.

Преобразуем уравнение шкалы прибора так:

$$\alpha = A I I = S I,$$

где $S = A I$ — чувствительность электромагнитного прибора.

Чувствительность электромагнитного прибора зависит от значения измеряемого тока. При измерении малых токов она мала, причем настолько, что начало шкалы (10. . . 15 % шкалы) даже не градуируют.

При измерении больших токов с целью получения более равномерной шкалы стремятся изготовить прибор так, чтобы чувствительность его практически оставалась постоянной. Это удастся сделать при помощи установки специальных ферромагнитных косынок 9 (рис. 3.1, а), путем подбора формы ферромагнитной пластинки 7 и пространственного расположения сердечника относительно катушки.

Аналогично работает электромагнитный прибор с круглой катушкой. При пропускании по катушке измеряемого тока возникающий внутри нее магнитный поток намагничивает ферромагнитные пластинки 11 и 12 одинаково (рис. 3.1, б). Например, если подвижная 12 и неподвижная 11 пластинки расположены так, как показано на рисунке 3.1, б, то, учитывая, что одноименные полюса отталкиваются друг от друга с силой, зависящей от квадрата магнитной индукции, а следовательно, от квадрата силы тока, протекающего по рамке, уравнение шкалы прибора можно записать в следующем виде

$$\alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{dL}{d\alpha} = S I. \quad (3.2)$$

Следовательно, чувствительность S прибора зависит от силы измеряемого тока, пространственного положения сердечника и скорости изменения индуктивности системы при ее повороте.

Для получения шкалы прибора, близкой к равномерной, а не квадратичной, стремятся прибор выполнить так, чтобы при измерении малых токов величина dL/da была большой, а при измерении больших токов — малой. Этого достигают установкой магнитного шунта, выполненного в виде ферромагнитных косынок, путем подбора формы сердечника и его места расположения относительно катушки.

3.3. Какие достоинства и недостатки имеют электромагнитные приборы!

Из уравнений шкалы прибора (3.1) и (3.2) видно, что угол отклонения стрелки прибора зависит от квадрата тока. Это говорит о том, что приборы электромагнитной системы могут работать в цепях постоянного и переменного тока.

При протекании по катушке переменного тока подвижный сердечник перемагничивается одновременно с изменением направления магнитного поля, и направление вращающего момента не меняется, то есть изменение знака тока не влияет на знак угла отклонения. Из формул (3.1) и (3.2) также видно, что показание прибора в цепи переменного тока пропорционально действующим значениям измеряемых величин.

Приборы просты по устройству, дешевы, особенно щитовые. Они могут непосредственно измерять большие токи, так как катушки у них неподвижны и их легко изготовить из проводов с большой площадью сечения.

Промышленность изготавливает амперметры электромагнитной системы для непосредственного включения на токи до 150 А.

Приборы выдерживают не только кратковременные, но и длительные перегрузки, если таковые возникают в процессе измерения.

К недостаткам электромагнитных приборов можно отнести: неравномерность шкалы и относительно низкую чувствительность при измерении малых токов, то есть сравнительно низкую точность измерения в начале шкалы, зависимость показаний приборов от влияния внешних магнитных полей, низкий частотный диапазон измерений, большую чувствительность приборов к колебаниям частот тока и большое их собственное потребление (достигающее 2 Вт у амперметров на токи до 10 А и 3...20 Вт у вольтметров в зависимости от напряжения).

У многих приборов шкала близка к равномерной.

Относительно низкой чувствительностью обладают приборы, имеющие закрепленную в кернах ось, противодействующую пружину и воздушный или электромагнитный успокоитель. Промышленность освоила выпуск электромагнитных приборов с высокой чувствительностью за счет применения растяжек и жидкостного успокоителя.

Электромагнитные приборы подвержены влиянию внешних магнитных полей, так как имеют очень слабое собственное магнитное поле. Дело в том, что катушки изготавливают без ферромагнитных сердечников, поэтому создаваемое в них магнитное поле замыкается по воздуху, а известно, что воздух представляет собой среду с очень большим магнитным сопротивлением. Для устранения влияния магнитных полей широко используют различные магнитные экраны или изготавливают приборы в астатическом исполнении.

В астатических приборах вместо одной катушки с сердечником применяют две неподвижные катушки и два сердечника, соответственно насаженных на одну ось со стрелкой. Обмотки катушек соединены между собой последовательно и так, что при прохождении через них измеряемого тока в них создаются магнитные потоки, направленные навстречу один другому. Если прибор оказывается во внешнем магнитном поле, то оно усиливает магнитное поле у одной катушки и уменьшает у другой. Следовательно, увеличение вращающего момента у одной катушки компенсируется таким же уменьшением вращающего момента у второй. Так компенсируется влияние внешнего однородного магнитного поля. Если внешнее магнитное поле неоднородно, то происходит только частичная компенсация.

3.4. В чем особенность электромагнитных приборов с высокой чувствительностью!

Высокая чувствительность электромагнитных приборов достигается благодаря применению растяжек при креплении подвижной ферромагнитной пластинки. У растяжек удельный противодействующий момент W значительно меньше, чем у обычных спиральных пружин, поэтому резко повышается чувствительность таких приборов:

$$S = \frac{1}{2W} I \frac{dL}{d\alpha}.$$

По конструкции электромагнитный прибор с высокой чувствительностью — это прибор с круглой катушкой, внутри которой установлена неподвижная ферромагнитная пластинка, а рядом с ней на растяжках укреплена подвижная ферромагнитная пластинка. При прохождении по катушке измеряемого тока внутри нее возникает магнитное поле, ферромагнитные пластинки намагничиваются, и между одноименно намагниченными полюсами пластин возникает сила отталкивания. Эта сила создает относительно оси растяжки вращающий момент, пропорциональный квадрату тока. Вращающий момент, даже очень слабый, вызывает поворот подвижной системы со стрелкой прибора до тех пор, пока этот момент не уравнивается противодействующим моментом, возникающим в растяжках.

Второй конструктивной особенностью этих приборов является применение жидкостного успокоителя, использующего вязкие свойства кремнийорганических жидкостей. Это позволяет уменьшить массу и габаритные размеры электромагнитных приборов.

3.5. Как устроены и работают электромагнитные логометры!

Электромагнитный логометр состоит из двух неподвижных катушек 1 и 2 (рис. 3.2), расположенных на значительном расстоянии одна от другой (чтобы уменьшить их взаимное влияние), и двух

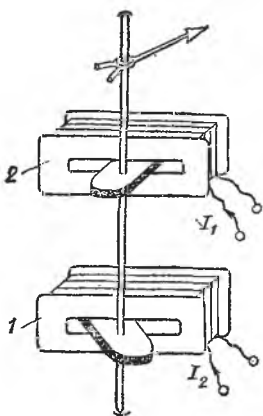


Рис. 3.2. Электромагнитный логометрический механизм.

сердечников, укрепленных на подвижной оси со стрелкой. Сердечники расположены так, чтобы при повороте подвижной системы в некоторых пределах индуктивность одной катушки увеличивалась, а другой — уменьшалась. В связи с этим производные $dL_1/d\alpha$ и $dL_2/d\alpha$ имеют разные знаки, следовательно, и вращающие моменты, действующие на сердечники, направлены в противоположные стороны. Под действием разности этих вращающих моментов подвижная система вместе со стрелкой прибора поворачивается в сторону действия большего момента. Поскольку в логометрах нет противодействующей пружины, вся система будет двигаться до тех пор, пока вращающие моменты M_1 и M_2 не сравняются.

Угол отклонения стрелки у электромагнитных логометров зависит от отношения токов, протекающих по рамкам. Это свойство электромагнитного логометра нашло применение при изготовлении фазометров и частотомеров.

Глава 4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

4.1. Как устроен электродинамический прибор?

Электродинамический прибор имеет неподвижную катушку 3 (рис. 4.1, а), выполненную, как правило, из толстой проволоки и имеющую малое число витков и подвижную катушку 4 из тонкой проволоки с большим числом витков. На оси подвижной катушки закреплены стрелка 2 и две спиральные тонкие пружинки 1. Пружинки служат для подачи тока в подвижную катушку и для создания противодействующего момента.

Для быстрого успокоения прибора, как правило, устанавливают воздушный успокоитель (демпфер) 5, так как собственное магнитное поле прибора мало из-за отсутствия ферромагнитных сердечников.

4.2. Как работает электродинамический прибор?

При пропускании тока I_1 по неподвижной катушке 3 (рис. 4.1, б) в ней создается магнитный поток Φ , направление которого зависит от направления тока в катушке и определяется по правилу правой руки. Так, при токе I_1 , направленном, как указано на рисунке 4.1, б, магнитный поток Φ пронизывает подвижную катушку сверху вниз. Если теперь пропустить ток I_2 по подвижной катушке, то на каждый ее проводник будет действовать сила $F = B_1 I_2 l$. Направление силы определяется по правилу левой руки. Общая сила, действующая на рамку, создает вращающий момент, под действием которого подвижная рамка, а вместе с ней и стрелка прибора будут поворачи-

чиваться в сторону действия силы. Поворот системы будет происходить до тех пор, пока тормозной или противодействующий момент, создаваемый спиральными пружинками, не станет равным вращающему.

Уравнение шкалы прибора имеет вид:

$$\alpha = \mu_0 \frac{w_1 w_2 l_2 b}{l_1 W} I_1 I_2 = S I_1 I_2. \quad (4.1)$$

Из выражения (4.1) видно, что в электродинамическом приборе угол отклонения стрелки зависит от произведения токов, протекающих по катушкам.

В цепи переменного тока вращающий момент у электродинамического прибора в любой момент времени зависит от произведения

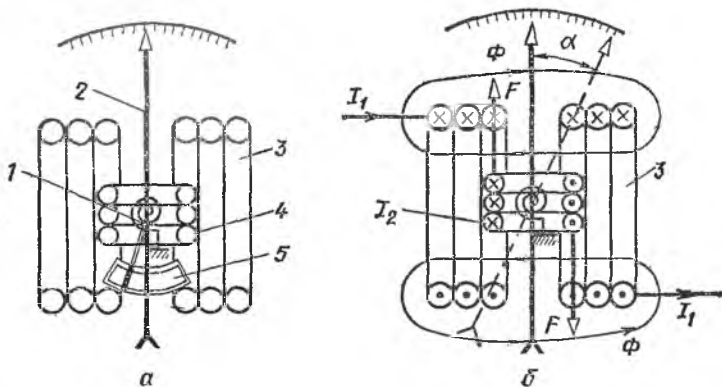


Рис. 4.1. Электродинамический измерительный механизм: а — устройство; б — схема, поясняющая принцип работы.

мгновенных значений токов i_1 и i_2 или от произведения действующих значений токов I_1 и I_2 и косинуса угла сдвига фаз между ними:

$$M_{вр} = S I_1 I_2 \cos \psi,$$

где ψ — угол сдвига фаз между I_1 и I_2 .

Отсюда можно сделать вывод о том, что электродинамическим прибором можно измерять электрический ток, электрическое напряжение и мощность в цепи как постоянного, так и переменного тока.

4.3. Как включают катушки электродинамического прибора при измерении напряжения и тока!

При измерении напряжения подвижную и неподвижную катушки прибора включают последовательно и вместе с добавочным сопротивлением включают в сеть на измеряемое напряжение. В этом случае при постоянном напряжении значение угла отклонения стрелки

прибора описывается выражением:

$$\alpha = SI_x I = SI^2 = SU^2/R^2 = S_U U, \quad (4.2)$$

где $R = r_n + r_n + R_d$ — общее сопротивление в цепи прибора; S — чувствительность вольтметра.

В цепи переменного тока угол $\psi = 0$, а $\cos \psi = 1$, поскольку через катушки идет один и тот же ток. Следовательно,

$$\alpha = SI^2 = SU^2/Z^2 = S_U U, \quad (4.3)$$

где S_U — чувствительность вольтметра в цепи переменного тока; Z — полное сопротивление цепи прибора.

Из формул (4.2) и (4.3) видно, что прибором можно измерять напряжения в цепях постоянного и переменного тока и что шкала прибора квадратичная, то есть неравномерная. Практически стремятся изготовить прибор таким образом, чтобы чувствительность его была примерно постоянной. Этого добиваются особым взаимным расположением катушек.

При измерении малых токов до 0,5 А катушки включают последовательно, поэтому $\alpha = SI^2$. Прибор также может работать в цепях постоянного и переменного тока и имеет неравномерную шкалу.

При измерении больших токов, то есть больше 0,5 А, катушки включают параллельно. В цепи катушек включают такие добавочные резисторы, чтобы угол сдвига фаз между токами в катушках был равен нулю. В этом случае ток в каждой катушке пропорционален общему току в цепи, то есть $I_1 = k_1 I$, $I_2 = k_2 I$, а угол отклонения стрелки прибора

$$\alpha = S k_1 k_2 I^2 = S_I I,$$

где $S_I = k_1 k_2 S I$ — чувствительность амперметра.

Шкала прибора неравномерная.

Предел измерений электродинамического прибора по току зависит от числа секций неподвижной катушки. В большинстве приборов токовая катушка состоит из двух секций, поэтому прибор имеет два предела измерений по току. При одном пределе измерений секции включают последовательно, а при другом (большем) — параллельно. В некоторых приборах устанавливают четыре секции, следовательно, прибор имеет четыре предела измерений по току.

4.4. Как включают катушки электродинамического прибора при измерении мощности?

При измерении мощности в цепи постоянного тока неподвижную катушку включают последовательно с нагрузкой (рис. 4.2, а), то есть на ток сети. Ее называют токовой катушкой прибора.

Подвижную катушку включают параллельно нагрузке, то есть на напряжение сети, ее называют катушкой напряжения. Если ток нагрузки не больше допустимого тока катушки, то последнюю непосредственно включают в сеть.

Последовательно с катушкой напряжения обычно включают большое добавочное сопротивление R_d , так как сама катушка рас-

считана на малый ток (обычно 30 мА). При таком включении значение тока в подвижной катушке I_2 можно определить по формуле

$$I_2 = U / r_{\Pi} + R_d,$$

где r_{Π} — сопротивление подвижной катушки; R_d — добавочное сопротивление.

Так как обычно r_{Π} и R_d величины постоянные, то ток I_2 зависит только от значения приложенного напряжения: $I_2 = kU$, а угол отклонения стрелки прибора α зависит от мощности:

$$\alpha = SI_1 I_2 = SI_1 kU = SkIU = S_P I U = S_P P, \quad (4.4)$$

где S_P — чувствительность ваттметра по мощности (для данного прибора величина постоянная).

Из выражения (4.4) видно, что при соответствующей градуировке шкалы прибора им можно измерять мощность в цепи постоянного тока. Шкала прибора равномерная.

Из схемы включения ваттметра видно, что начала катушек напряжения и тока подключены к общему зажиму сети, поэтому между началами обмоток можно устанавливать перемычку. Начало обмоток обозначают на приборе звездочкой, то есть U^* и I^* , а на электрических схемах точкой, поставленной около начала катушки.

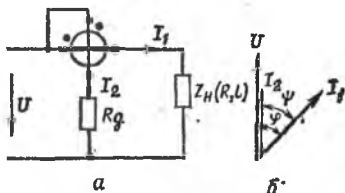


Рис. 4.2. Схема включения катушек (а) и векторная диаграмма токов и напряжений электродинамического измерительного механизма (б) при измерении активной мощности.

4.5. В чем особенность ваттметра для измерения активной мощности в цепи переменного тока?

При измерении активной мощности в цепи однофазного переменного тока катушки прибора включают по схеме, приведенной на рисунке 4.2, а, причем активное сопротивление добавочного резистора R_d , как правило, во много раз больше сопротивления самой катушки, и последним поэтому можно пренебречь, тогда

$$I_2 = U / R_d = kU,$$

где k — коэффициент пропорциональности между током и напряжением.

Ток I_2 совпадает по фазе с поданным напряжением U (рис. 4.2, б). Ток нагрузки I_1 отстает от напряжения на угол φ , так как включена активно-индуктивная нагрузка Z_n (рис. 4.2, а).

Из векторной диаграммы видно, что в этом случае угол сдвига фаз между токами ψ . Тогда значение угла отклонения стрелки такого прибора

$$\alpha = SI_1 I_2 \cos \psi = SI_1 kU \cos \varphi = S_P U I_1 \cos \varphi = S_P P,$$

где S_P — чувствительность прибора по мощности,

Угол отклонения стрелки зависит от активной мощности в сети, и при соответствующей градуировке прибором можно измерять активную мощность в цепи переменного тока.

4.6. Какие достоинства и недостатки имеют электродинамические приборы?

К достоинствам электродинамических приборов можно отнести следующие:

пригодность для работ в цепях постоянного и переменного токов;

высокую точность измерения постоянного тока (класс точности 0,1 и даже 0,05);

пригодность для измерения мощности в цепях постоянного тока, для измерения активной и реактивной мощности в цепях переменного тока;

равномерность шкалы при измерении мощности;

возможность использования для учета расхода электрической энергии в цепях постоянного тока.

К недостаткам электродинамических приборов можно отнести следующие:

неравномерность шкалы при измерении токов и напряжений; большое собственное потребление, достигающее нескольких десятков ватт;

зависимость показаний приборов от влияния внешних магнитных полей, так как собственное магнитное поле слабое;

зависимость показаний приборов от температуры окружающего воздуха и частоты измеряемого тока;

ограниченность пределов измерений по току и напряжению из-за близкого расположения подвижной и неподвижной катушек.

4.7. В чем особенность электродинамического логометра?

Электродинамические логометры имеют две подвижные и две неподвижные катушки. Подвижные катушки укреплены на одной оси и получают питание не через спиральные пружинки, как у обычных приборов, а через тонкие ленточки, не создающие противодействующего момента. Поэтому при отсутствии токов в катушках стрелка прибора занимает произвольное положение на шкале прибора.

При работе логометра неподвижные катушки его включаются в сеть последовательно с нагрузкой.

Подвижные катушки включаются параллельно нагрузке, но последовательно с добавочными сопротивлениями. Эти сопротивления обычно разные по своим параметрам, поэтому токи I_1 и I_2 , протекающие через подвижные катушки (рис. 4.3, а), сдвинуты по фазе от напряжений на разные углы φ_1 и φ_2 (рис. 4.3, б), а следовательно, и на разные углы относительно тока нагрузки (ψ_1 и ψ_2).

При взаимодействии тока неподвижной катушки с токами подвижных катушек I_1 и I_2 создаются два вращающих момента M_1 и M_2 .

Катушки прибора располагают так, что при определенном направлении токов I_1 и I_2 направления моментов M_1 и M_2 проти-

воположны. Поэтому подвижная система прибора вместе со стрелкой отклоняется в сторону действия большего вращающего момента до тех пор, пока моменты не уравниваются.

Уравнение шкалы электродинамического логометра имеет вид

$$\alpha = S_{\pi} \left(\frac{I_1 \cos \psi_1}{I_2 \cos \psi_2} \right). \quad (4.5)$$

Из выражения (4.5) видно, что в электродинамических логометрах угол отклонения стрелки прибора зависит от отношения токов, протекающих по подвижным катушкам I_1/I_2 , и от косинусов углов

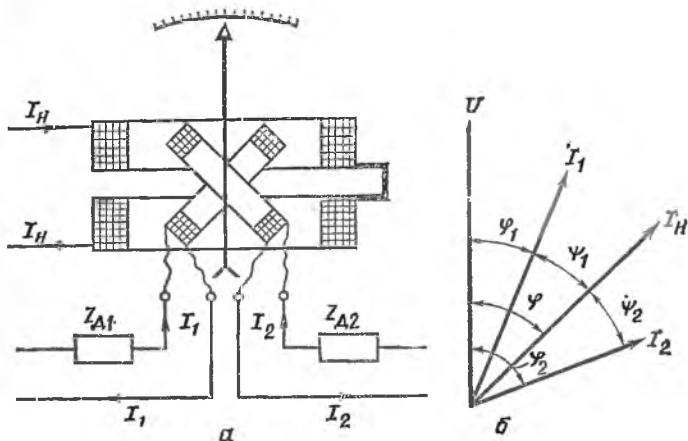


Рис. 4.3. Электродинамический логометрический механизм: а — схема; б — векторная диаграмма.

сдвига фаз этих токов относительно тока, протекающего в неподвижной катушке. Это свойство электродинамического логометра нашло применение при изготовлении переносных и щитовых фазометров и частотомеров промышленной частоты.

4.8. Как устроены и работают ферродинамические приборы!

Ферродинамические приборы отличаются от электродинамических тем, что у них как неподвижная, так и подвижная катушки имеют свои магнитопроводы, выполненные из ферромагнитного материала. Благодаря этому внутри катушек создаются сильные магнитные поля, которые, взаимодействуя между собой, вызывают появление вращающего момента на оси подвижной катушки. Она начинает поворачиваться, спиральные пружинки, подводящие ток в подвижную катушку, начинают закручиваться и создавать противодействующий момент. Подвижная система вместе со стрелкой поворачивается до тех пор, пока вращающий момент не уравнивается противодействующим моментом.

Уравнение шкалы ферродинамического прибора имеет вид

$$\alpha = \frac{k}{W} I_1 I_2 \cos \psi = S I_1 I_2 \cos \psi,$$

где S — чувствительность ферродинамического прибора.

Из уравнения шкалы прибора видно, что ферродинамические приборы, как и электродинамические, могут использоваться для измерения переменных токов и напряжений, а также мощности в цепях переменного тока. Они нашли наибольшее применение в самопишущих амперметрах, вольтметрах, ваттметрах.

Благодаря собственному сильному магнитному полю эти приборы не подвержены влиянию внешних магнитных полей.

Основные недостатки ферродинамических приборов — относительно малая точность (классы точности 1. . . 2,5), большое собственное потребление и чувствительность к колебаниям частоты.

Глава 5. ИНДУКЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ

5.1. Как устроен и работает индукционный прибор

Измерительный механизм индукционного прибора состоит из двух магнитопроводов 1 и 4 (рис. 5.1), набранных из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга. На магнитопроводе 1 намотана катушка из толстого провода с малым числом витков ω_1 , на магнитопроводе 4 — катушка из тонкого провода с большим числом витков ω_2 . Магнитопроводы расположены таким образом, что создаваемые в них магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 пронизывают алюминиевый диск 6. Диск может вращаться в поле постоянного магнита 5, установленного для создания противодействующего момента. На оси диска расположен червяк 2, передающий движение диска на счетное устройство 3.

Принцип работы индукционного прибора следующий. При подаче в первую катушку переменного тока I_1 в ней возникает переменный поток Φ_1 , который, пронизывая алюминиевый диск, наводит в нем ЭДС $E = 4,44 f_1 \omega_1 \Phi_{M1}$. Так как диск сплошной, то под действием ЭДС в нем возникает вихревой ток $I_{в1} = E_1 / R_{диск}$.

Этот ток, замыкаясь по диску, попадает в поле действия магнитного потока Φ_2 , вызванного прохождением тока во второй катушке. Значение силы F_1 взаимодействия переменного магнитного потока Φ_2 с током $I_{в1}$ можно выразить следующей формулой:

$$F_1 = B_2 I_{в1} l = \frac{k \Phi_2}{S} I_{в1} = k_2 \frac{f}{R_{диск}} \Phi_1 \Phi_2.$$

Эта сила относительно оси диска создает вращающий момент

$$M_{вр1} = F_1 b = k_3 \Phi_1 \Phi_2,$$

который стремится повернуть диск по часовой стрелке. В свою очередь, переменный магнитный поток Φ_2 вызывает в диске вихревой ток $I_{в2}$. Значение силы взаимодействия переменного магнитного потока Φ_1 с током $I_{в2}$ можно описать уравнением

$$F_2 = k_4 \Phi_1 \Phi_2.$$

Эта сила относительно оси диска создает второй вращающий момент $M_{вр2} = F_2 b = k_b \Phi_1 \Phi_2$, который стремится вращать алюминиевый диск против часовой стрелки.

Результирующий вращающий момент пропорционален произведению магнитных потоков, пронизывающих алюминиевый диск, и синусу угла сдвига фаз ψ между ними:

$$M_{вр} = M_{вр1} - M_{вр2} = k \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi, \quad (5.1)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических размеров магнитопроводов, их материала и расположения, от числа витков катушек, частоты тока, сопротивления алюминиевого диска и других факторов.

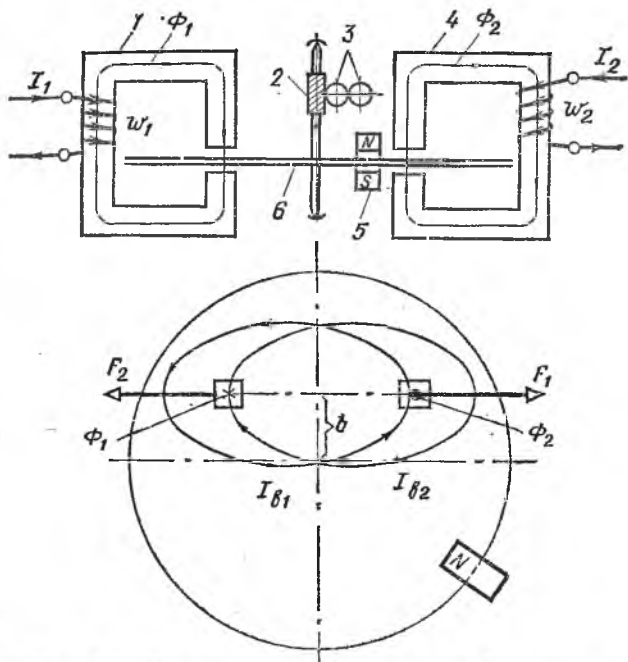


Рис. 5.1. Индукционный измерительный механизм.

Чтобы алюминиевый диск под действием вращающего момента сильно не раскручивался, в приборе предусматривается устройство, в котором создается противодействующий момент. Таким устройством является постоянный магнит.

5.2. Как устроен и подключается индукционный счетчик электроэнергии!

Индукционный счетчик состоит из магнитопровода 4, на котором намотана токовая катушка с числом витков w_1 , магнитопровода 7, на котором намотана катушка напряжения с большим числом вит-

ков ω_2 , алюминиевого диска 5, постоянного магнита 8 для создания противодействующего момента, противоположной пластинки 9 для направления основной части потока Φ_2 через алюминиевый диск — эту часть потока называют рабочим Φ_p (рис. 5.2, а). На рисунке не показаны счетное устройство и мелкие детали.

В счетчике имеются четыре основные клеммы. Они обозначены буквами Г и Н. Буква Г означает, что к этой клемме нужно подать питание, то есть подключить провода, идущие от генератора из сети.

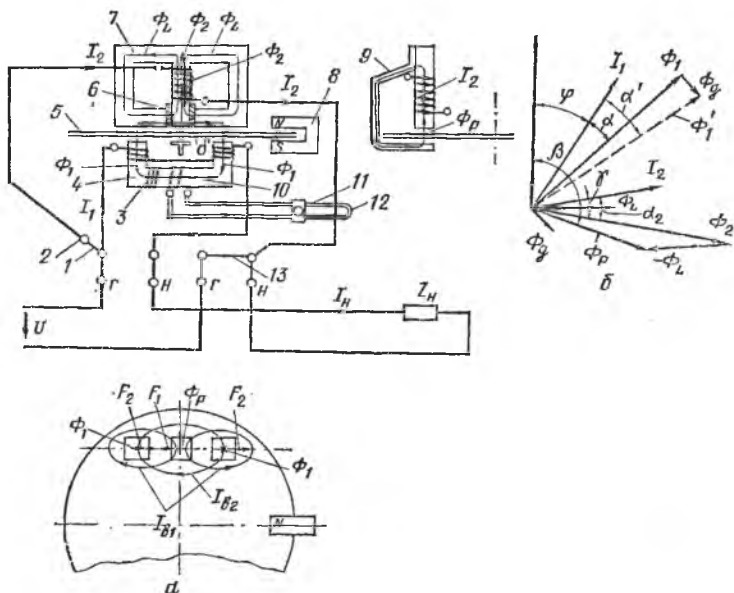


Рис. 5.2. Индукционный счетчик электрической энергии:
а — устройство; б — векторная диаграмма.

Буква Н означает, что к этим клеммам надо подключить провода, идущие к нагрузке.

Из рисунка видно, что провода, идущие от сети, и провода, идущие к нагрузке, подключаются поочередно, то есть через одну клемму. Этот порядок подключения проводов сохраняется во всех счетчиках, в том числе и в счетчиках трехфазного переменного тока как активной, так и реактивной энергии.

Начало катушки напряжения подключается к началу токовой катушки через вспомогательную клемму 2 и переключку 1. Внутри счетчика установлена переключку 13.

5.3. Как работает индукционный счетчик электрической энергии?

При подключении счетчика к сети и при включении нагрузки по токовой катушке начинает проходить ток нагрузки I_1 , который вызывает в токовой катушке намагничивающую силу $I_1\omega_1$ и создает

в ней магнитный поток Φ_1 . Этот поток дважды, сверху и снизу, пронизывает диск. Поток Φ_1 наводит в диске ЭДС и вихревой ток $I_{в1}$, который, согласно закону Ленца, направлен так, что магнитный поток, созданный этим током, стремится уменьшить возрастающий магнитный поток Φ_1 (рис. 5.2, а). Направление вихревого тока $I_{в1}$ определяют по правилу правой руки или буравчика. При прохождении тока I_2 по катушке напряжения в ней тоже создается намагничивающая сила $I_2\omega_2$, которая вызывает в катушке магнитный поток Φ_2 . Часть потока Φ_2 рассеивается через боковые отводы и не пронизывает диск, эту часть потока называют потоком рассеяния Φ_L . Основная часть потока Φ_2 проходит через противоположную пластинку 9 и пронизывает алюминиевый диск 5. Эту часть потока Φ_2 называют рабочим потоком Φ_p . В рассматриваемый момент времени поток Φ_p пронизывает диск снизу вверх, что обозначено на виде сверху точкой.

В результате взаимодействия рабочего потока Φ_p и вихревого тока $I_{в1}$ на диск действует сила F_1 , которая и создает относительно оси диска первый вращающий момент.

Переменный рабочий поток Φ_p индуцирует в диске вихревой ток $I_{в2}$. Этот ток, замыкаясь по диску, попадает в поле действия магнитного потока Φ_1 . В результате их взаимодействия на диск действует сила F_2 , создающая относительно оси диска второй вращающий момент.

Результирующий вращающий момент пропорционален произведению магнитных потоков Φ_1 и Φ_p , пронизывающих алюминиевый диск, а также синусу угла сдвига фаз между ними:

$$M_{вр} = k\Phi_1\Phi_p \sin \psi. \quad (5.2)$$

Этот момент и вызывает вращение диска в поле постоянного магнита. В диске наводится ЭДС и возникают вихревые токи. Относительно оси диска создается тормозной момент (противодействующий), пропорциональный скорости вращения диска,

$$M_{пр} = k_4 n, \quad (5.3)$$

где k_4 — коэффициент пропорциональности; n — число оборотов диска в единицу времени.

При подключении нагрузки скорость вращения диска увеличивается до тех пор, пока вращающий момент не уравновесится противодействующим моментом

$$M_{вр} = M_{пр}. \quad (5.4)$$

Подставляя значения моментов в равенство (5.4), получим равенство

$$k_1 P = k_4 n. \quad (5.5)$$

Умножив левую и правую части выражения (5.5) на t — некоторый промежуток времени и полагая $Pt = W_э$, где $W_э$ — потребление электрической энергии в сети, после преобразований получим

$$W_э = \frac{k_4}{k_1} N_t = c N_t, \quad (5.6)$$

где c — постоянная счетчика, показывающая, какое количество электрической энергии расходуется в сети за один оборот диска; N_t — число оборотов диска за время наблюдения t , $N_t = nt$.

Из формулы (5.6) видно, что значение потребляемой электрической энергии пропорционально числу оборотов диска счетчика.

5.4. Почему не весь магнитный поток Φ_2 направляют через алюминиевый диск?

Для того чтобы можно было измерить индукционным счетчиком активную мощность, надо изготовить прибор так, чтобы вращающий момент (5.2), действующий на диск, был пропорционален активной мощности:

$$M_{вр} = k_1 UI \cos \varphi. \quad (5.7)$$

Для этого необходимо выполнить следующие три условия:

один из потоков Φ_1 или Φ_p должен быть пропорционален току нагрузки I_1 . Условие $\Phi_1 = k_2 I_1$ выполняется при включении одной из обмоток счетчика последовательно с нагрузкой;

второй поток должен быть пропорционален напряжению сети. Для этого вторую катушку включают на напряжение сети, тогда $\Phi_p = k_3 U$;

синус угла ψ должен быть равен косинусу угла φ , что возможно, когда угол $\psi = 90^\circ \pm \varphi$.

Рассмотрим векторную диаграмму напряжений и токов счетчика (рис. 5.2, б). При активно-индуктивной нагрузке ток I_1 отстает от напряжения U на некоторый угол φ и создает в первом магнитопроводе магнитный поток Φ_1 , который вследствие явления гистерезиса отстает от намагничивающего тока на некоторый угол α . Ток I_2 , проходящий через катушку напряжения, отстает от напряжения U на угол, близкий к 90° , и создает в катушке магнитный поток Φ_2 , который отстает от намагничивающего тока на угол α_2 . Поток Φ_L рассеивается через воздушный зазор и отстает от намагничивающего тока I_2 на меньший угол. Если из вектора Φ_2 вычтеть вектор Φ_L , то получится вектор рабочего магнитного потока Φ_p , который отстает от вектора напряжения U на угол β . Угол сдвига фаз между потоками Φ_1 и Φ_p равен $\psi = \beta - \alpha - \varphi = (\beta - \alpha) - \varphi$. Отсюда следует, что для того чтобы угол ψ был равен $90^\circ - \varphi$, необходимо прибор изготовить так, чтобы угол $\beta - \alpha$ был равен 90° . Для изменения угла β достаточно изменить поток Φ_L , например путем изменения воздушного зазора δ . В некоторых приборах для этой цели предусматривают специальные пластины из ферромагнитного материала b (рис. 5.2, а), которые можно вдвигать в зазор или выдвигать из него и тем самым изменять в определенных пределах значение потока рассеяния Φ_L и его угол отставания γ , а следовательно, и угол β . Чем больше воздушный зазор δ , тем меньше поток Φ_L и тем меньше угол γ , и наоборот.

Изменением угла β часто не удается получить равенство: $\beta - \alpha = 90^\circ$, поэтому приходится изменять угол α . С этой целью на токовом магнитопроводе устанавливают специальные короткозамкнутые витки 3 , а иногда и дополнительную катушку 10 с небольшим числом витков, замкнутую на специальную петлю из толстого провода 12 с подвижной перемычкой 11 . При помощи перемычки можно изменить значение сопротивления петли. Пронизывая короткозамкнутые витки и катушку, переменный магнитный поток Φ_1 вызывает в них появление ЭДС и токов, которые по фазе отстают от потока

Φ_1 на угол, близкий к 90° , и создает дополнительный поток Φ_d (рис. 5.2, б). Если сложить вектор потока Φ_1 с вектором Φ_d , то результирующий поток, пронизывающий алюминиевый диск, равен Φ_1 и отстает от тока I_1 на угол, больший угла α . Так изменением углов β и α можно добиться выполнения условия $\sin \psi = \cos \varphi$.

При выполнении всех трех условий получается прибор, у которого вращающий момент пропорционален активной мощности:

$$M_{вр} = k\Phi_1\Phi_p \sin \psi = k_1 I_1 U \cos \varphi = k_1 P.$$

5.5. Почему возникает самоход счетчика?

При отключении нагрузки диск счетчика иногда продолжает вращаться, то есть наблюдается самоход. Почему диск вращается? Дело в том, что для компенсации момента трения в счетчике предусматривают специальные компенсирующие устройства. Например, на пути рабочего магнитного потока устанавливают либо специальную пластинку, либо короткозамкнутый виток, либо ставят компенсационный винт. При этом рабочий поток Φ_p как бы раздваивается на потоки Φ_p' и Φ_p'' , между которыми появляется некоторый угол сдвига фаз ψ из-за разного магнитного сопротивления на пути потоков. Таким образом, в диске появляется дополнительный момент $M_k = k\Phi_p' \Phi_p'' \sin \psi$, который и компенсирует момент трения в счетчике. Обычно полная компенсация момента трения происходит при нагрузке счетчика более 100 % и номинальном питающем напряжении в сети. Поэтому при холостом ходе, то есть работе счетчика без нагрузки, момент компенсации становится больше момента трения, и диск под действием разности этих моментов приходит в движение, то есть возникает самоход. Особенно влияние самохода проявляется при повышении напряжения в сети, например в ночное время. В этом случае момент компенсации M_k возрастает, так как он зависит от квадрата приложенного напряжения: $\Phi_p' = k_1 U$, $\Phi_p'' = k_2 U$ и $M_k = k_1 k_2 U^2 = k U^2$.

Для устранения самохода в счетчиках предусмотрено специальное устройство, создающее дополнительный тормозной момент,

Глава 6. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ПРИБОРЫ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

6.1. Как устроен и работает электростатический прибор?

Прибор состоит из двух или трех электродов, одного подвижного и одного или двух неподвижных. На электроды подается напряжение. На одном электроде накапливается отрицательный заряд, на других — положительный. Между заряженными телами происходит взаимодействие, отталкивание одноименно заряженных и притягивание разноименно заряженных. В результате этого один из электродов приходит в движение. Движение (перемещение) электрода фиксируется. Например, на рисунке 6.1, а показан прибор, у которого средний электрод 4 подвижный, а крайние 3 и 5 неподвижные. При подаче напряжения подвижный электрод отклоняется,

через специальную тягу 2 и поводок 1 это движение передается на ось стрелки и на самое стрелку. Стрелка прибора будет отклоняться до тех пор, пока вращающий момент не уравновесится противодействующим моментом. Уравнение шкалы такого прибора имеет вид:

$$\alpha = \frac{k_2 U^2}{W} = k_2 \frac{U}{W} U = SU, \quad (6.1)$$

где S — чувствительность электростатического прибора.

Из формулы (6.1) видно, что прибор может работать в цепях постоянного и переменного тока.

Шкала прибора квадратичная, то есть неравномерная. Для того чтобы шкала прибора была близка к равномерной, прибор стремятся выполнить так, чтобы при измерении малого и большого напря-

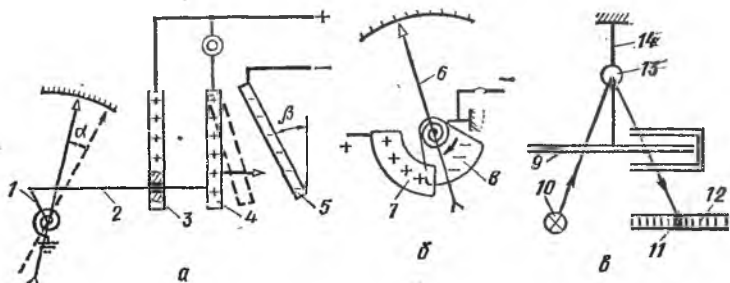


Рис. 6.1. Электростатический измерительный механизм:
а, б — с подвижным средним электродом; в — со световой стрелкой.

жения значение S было близко к постоянной величине. Так как S зависит от расположения электродов и их размеров, то есть от их емкости, то эту особенность учитывают при изготовлении приборов.

На рисунке 6.1, б показана одна из возможных конструкций электростатического прибора. Подвижный электрод 8 при подаче напряжения к прибору втягивается в зазор между двумя параллельно расположенными электродами 7. Вместе с подвижным электродом перемещается стрелка 6.

Очень большой чувствительностью обладают электростатические приборы, у которых подвижный электрод 9 укреплен на тонкой подвеске, имеющей очень маленький удельный противодействующий момент (рис. 6.1, в). Для улавливания незначительного угла поворота в таких приборах делают световую стрелку. Для этого на подвеске 14 устанавливают зеркальце 13, на него направляют луч света от источника 10. Луч, отражаясь от зеркала, попадает на шкалу 12 и создает там светлое пятно 11.

Увеличивая число зеркал, можно получить большую стрелку, достигающую длины 1 м. При такой большой световой стрелке заметны очень малые углы отклонения подвижной системы.

Подвижному электроду придается своеобразная форма, для того чтобы чувствительность прибора S при измерении любых напряжений оставалась примерно постоянной величиной, благодаря этому шкала прибора приближается к равномерной.

Большим достоинством электростатического прибора является то, что внутреннее сопротивление его при постоянном токе равно бесконечности, так как цепь тока разомкнута, а при переменном токе имеет очень большое значение, так как сопротивление конденсатора $x_C = 1/\omega C$ при малой емкости очень велико. Поэтому при измерении постоянного напряжения прибор совершенно не потребляет тока, а при измерении переменного напряжения ток ничтожно мал.

Электростатические приборы хороши тем, что их показания практически не зависят от частоты и формы кривой измеряемого напряжения и внешних магнитных полей.

Электростатические приборы пригодны для измерения напряжения как в цепи постоянного, так и в цепи переменного тока в большом диапазоне (от нескольких милливольт до нескольких киловольт).

Электростатические вольтметры применяются в цепях постоянного и переменного тока высокой и повышенной частоты низкого и высокого напряжения, обычно в лабораторных измерениях.

Недостатки приборов: малая чувствительность и невысокая точность (обычно классов 1...1,5), неравномерность шкалы, влияние внешних электрических полей и влажности воздуха.

Для уменьшения влияния внешних электрических полей электростатические приборы экранируют. Экраном может служить корпус прибора, если он металлический. Если корпус пластмассовый, то экраном служит металлическая фольга из немагнитного материала или алюминиевая краска, которой покрывают внутреннюю поверхность корпуса. Экран соединяют с одним из электродов и заземляют.

6.2. В чем особенность термоэлектрических приборов?

Термоэлектрические приборы представляют собой сочетание магнитоэлектрического прибора и термоэлектрического преобразователя. У магнитоэлектрического прибора угол отклонения стрелки зависит от тока, протекающего по рамке прибора. Эти приборы могут работать только в сети постоянного тока и обладают высокой чувствительностью и точностью. В связи с этим при измерении переменного тока нужно сначала преобразовать его в постоянный, а потом измерять. В качестве такого преобразователя в термоэлектрических приборах используется термопара, состоящая из двух разнородных электродов с общей точкой спая. При нагреве точки спая в термопаре наводится ЭДС e_t (рис. 6.2, а), значение которой зависит от разности температур между точкой спая $T_{сп}$ и свободными концами термопар $T_{св}$, а также от материалов, из которых изготовлены электроды.

Для конкретной термопары, установленной в приборе, значение ЭДС зависит только от разности температур $\Delta T = T_{сп} - T_{св}$. Определяющей величиной является $T_{сп}$. Поэтому точку спая укрепляют на проводнике, через который идет измеряемый ток, тогда при прохождении тока проводник нагревается тем больше, чем больше ток, при этом увеличиваются температура точки спая и термоЭДС и изменяется показание прибора. При соответствующей градуировке шкалы прибора им можно измерять ток любой частоты.

Точка спая может быть изолирована от проводника с измеряемым током (рис. 6.2, б) — тогда появляется возможность с целью

увеличения чувствительности соединить последовательно несколько таких термопар (рис. 6.2, в).

К достоинствам термоэлектрических приборов можно отнести следующее. Термоэлектрические приборы могут работать в цепях постоянного и переменного тока, особенно повышенных и высоких частот. Показание прибора не зависит от формы кривой измеряемого тока.

Основные недостатки этих приборов — неравномерная шкала (квадратичная), невысокие точность и чувствительность, значительное собственное потребление, низкая перегрузочная способность,

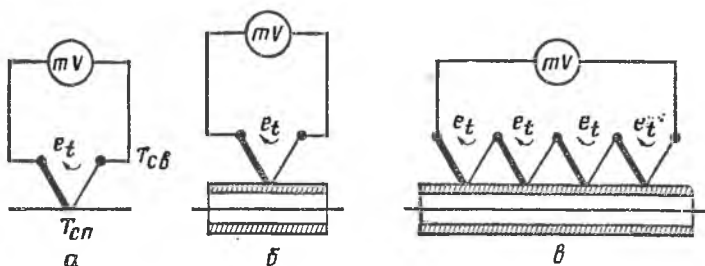


Рис. 6.2. Схемы термопреобразователей:

а — неизолированного; б — изолированного; в — с термобатарей.

зависимость показаний от температуры окружающей среды. малый срок службы.

Термоэлектрические приборы в основном используют для измерения токов в цепях с несинусоидальными токами высокой частоты.

6.3. В чем особенность электроизмерительных приборов с полупроводниковым выпрямителем!

Электроизмерительный прибор с полупроводниковым выпрямителем состоит, как правило, из магнитоэлектрического измерительного механизма и полупроводникового преобразователя, при помо-

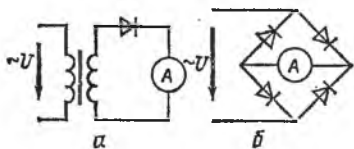


Рис. 6.3. Схемы электроизмерительных приборов с полупроводниковым выпрямителем:

а — однополупериодная; б — двухполупериодная мостовая.

щи которого происходит выпрямление переменного тока в постоянный. Выпрямленный ток измеряется магнитоэлектрическим прибором.

Полупроводниковый преобразователь (выпрямитель) может включаться по однополупериодной схеме (рис. 6.3, а). В этом случае наблюдается большая пульсация выпрямленного тока. Чаще применяют двухполупериодную, так называемую мостовую схему выпрямления (рис. 6.3, б).

Вследствие инерционности подвижной части прибора значение вращающего момента зависит от среднего значения выпрямленного тока $M_{вр} = kI_{ср}$.

Угол отклонения стрелки прибора также зависит от $I_{ср}$:

$$\alpha = SI_{ср}. \quad (6.2)$$

Из уравнения шкалы прибора (6.2) видно, что угол отклонения стрелки прибора пропорционален среднему значению выпрямленного тока. Шкалу прибора, как правило, градуируют в действующих значениях измеряемого переменного тока. Следовательно, прибор дает правильное показание только при синусоидальной форме кривой тока.

При использовании прибора следует обратить внимание, на какой род измеряемого тока он рассчитан. Если на приборе установлен знак «~», то это означает, что шкала прибора справедлива лишь при измерении переменного синусоидального тока, правда, определенной частоты (частотный диапазон указан обычно на шкале), и что класс точности прибора справедлив только в этом случае. Таким прибором пользоваться для измерений в цепи постоянного тока не стоит. И наоборот, если установлен знак «—», то можно пользоваться прибором только в цепи постоянного тока.

Иногда такие приборы имеют две шкалы: одну — для измерения переменного тока, а другую — для измерения постоянного тока или напряжения.

Основная особенность электроизмерительных приборов с полупроводниковым выпрямителем заключается в том, что они могут иметь несколько пределов измерений постоянного и переменного тока и напряжения, а также сопротивления. К таким приборам относятся тестеры, комбинированные приборы с маркой, начинающейся с буквы Ц. Например, комбинированный прибор Ц4340 предназначен для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока, действующего значения напряжения и силы переменного тока практически синусоидальной формы, сопротивления постоянному току.

Пределы допускаемой основной погрешности определяются при номинальных значениях влияющих величин и не превышают: $\pm 1\%$ предела измерений для постоянного тока, $\pm 2,5\%$ предела измерений для переменного тока, $\pm 1,5\%$ длины шкалы, равной 50 мм, при измерении сопротивления. Для расширения пределов измерений внутри приборов установлены многопредельные шунты и добавочные резисторы, которые включаются вне схем выпрямления.

Достоинства выпрямительных приборов следующие: высокая чувствительность, малое собственное потребление, широкий частотный диапазон (до 10 000 Гц), практически равномерная шкала.

Недостатки приборов — нелинейность шкалы, невысокий класс точности (не выше 1,5%), зависимость от температуры и формы кривой измеряемого тока.

Выпрямительные приборы в качестве миллиамперметров, милливольтметров, амперметров, вольтметров, ваттметров, частотомеров и универсальных приборов наиболее широко применяются в цепях промышленной и повышенной частоты,

6.4. Что такое аналоговый электронный измерительный прибор (АЭИП)? Какие АЭИП выпускаются промышленностью!

В аналоговых электронных измерительных приборах (в дальнейшем АЭИП) измеряемая величина преобразуется в аналоговую выходную величину перемещения указателя, а числовое ее значение определяется по шкале прибора. Показания АЭИП являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины.

Основные функциональные узлы АЭИП — электронные измерительные преобразователи и устройства. В качестве выходных устройств используют магнитоэлектрические механизмы или электронно-лучевые трубки (см. п. 7.2).

Наиболее широко среди АЭИП используются электронные вольтметры, осциллографы, частотомеры, фазометры, анализаторы спектра, приборы для измерения параметров электрических и электронных схем (сопротивлений, емкости, индуктивности и т. п.).

Приборы, выпускаемые промышленностью, разделяют на 20 подгрупп, которые обозначают прописными буквами. Ниже приведены наиболее распространенные подгруппы приборов.

Подгруппа В. Приборы для измерения напряжения;

- В2 — вольтметры постоянного тока;
- В3 — вольтметры переменного тока;
- В4 — вольтметры импульсного тока;
- В7 — вольтметры универсальные.

Подгруппа Г. Генераторы измерительные:

- Г3 — генераторы гармонических колебаний низкочастотные;
- Г4 — генераторы гармонических колебаний высокочастотные;
- Г5 — генераторы импульсов.

Подгруппа Е. Приборы для измерения параметров компонентов цепей с сосредоточенными параметрами;

- Е3 — измерители индуктивности;
- Е6 — измерители сопротивлений;
- Е7 — измерители емкостей.

Подгруппа С. Приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигнала и спектра:

- С1 — универсальные осциллографы;
- С7 — осциллографы скоростные, стробоскопические.

Подгруппа Ф. Приборы для измерения фазового сдвига;

- Ф2 — измерители фазового сдвига.

Подгруппа Ч. Приборы для измерения частоты;

- Ч3 — частотомеры электронно-счетные.

В обозначении комбинированного прибора, предназначенного для измерения нескольких физических величин, к основному обозначению подгруппы допускается добавлять букву К. Модернизированные приборы сохраняют свое прежнее обозначение, но после номера типа добавляется прописная буква русского алфавита: А —

первая модернизация, Б — вторая и т. д. Например, В2-25 — вольтметр постоянного напряжения, тип (модель) 25; ВК2-17 — вольтметр; ВЗ-38 — вольтметр переменного напряжения.

6.5. Как устроен и работает электронный вольтметр?

В состав электронного вольтметра входят усилители постоянного и переменного напряжений, преобразователи переменного напряжения в постоянное и постоянного в переменное, делители напряжения. В качестве выходных приборов в основном используются магнитоэлектрические микроамперметры.

Метрологические характеристики вольтметра (чувствительность, диапазон частот измеряемых напряжений) определяются типом

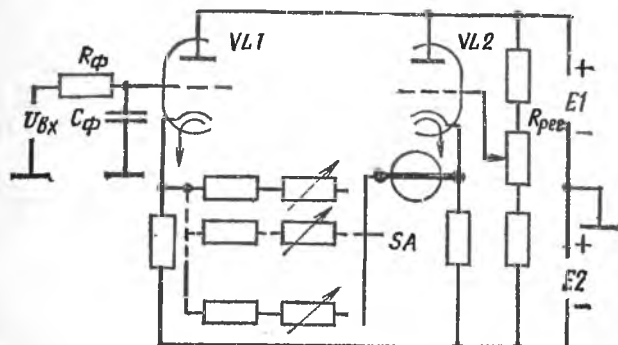


Рис. 6.4. Схема вольтметра постоянного напряжения на основе лампового усилителя.

и характеристиками усилителя. В вольтметрах используются усилители с непосредственными связями, усилители типа модуляция — усиление демодуляция (МДМ) и усилители на основе магнитоэлектрических гальванометров с фотопреобразователями.

Вольтметры постоянного напряжения имеют в качестве выходного измерительного механизма магнитоэлектрические микроамперметры с током полного отклонения 50. . . 500 мкА и сопротивлением рамки 500. . . 1000 Ом.

Ламповый усилитель с непосредственными связями состоит из двух катодных повторителей, включенных для уменьшения дрейфа нуля усилителя по параллельно-балансной схеме (рис. 6.4).

Измеряемое напряжение через низкочастотный фильтр R_{ϕ} , C_{ϕ} , ослабляющий переменную составляющую помехи, наложенной на измеряемый сигнал, поступает на сетку первого катодного повторителя на лампе $VL1$. При изменении $U_{вх}$ напряжение между электродами сетка — катод меняется незначительно и коэффициент передачи близок к единице. Потенциал сетки лампы $VL2$ близок к нулю и может быть изменен в некоторых пределах при помощи резистора $R_{рег}$, вынесенного на переднюю панель прибора. При помощи этого резистора стрелку прибора устанавливают на нуль. Предел измерений (0,1; 0,3; 1. . . 100 В) выбирают при помощи пере-

ключателя SA , который позволяет изменить сопротивление добавочного резистора, включаемого последовательно с рамкой магнитоэлектрического измерительного механизма.

На входе повторителя включен делитель, который позволяет увеличить пределы измерений до 500, 1000 В.

Приведенная погрешность вольтметров постоянного тока равна 1,5...2,5 %.

Обычно такие вольтметры входят в состав универсальных вольтметров (В7), измеряющих как постоянное, так и переменное напряжение.

Структурная схема вольтметра с усилителем типа МДМ, например В2-11, В2-15, В2-25 (рис. 6.5), включает фильтры Φ , моду-

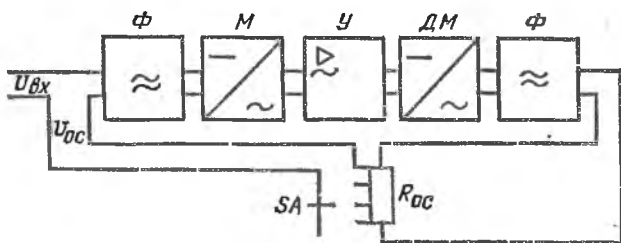


Рис. 6.5. Структурная схема вольтметра постоянного тока с усилителем типа МДМ.

лятор M , усилитель переменного напряжения U и демодулятор DM . Усилитель охвачен отрицательной обратной связью по току. Пределы измерений изменяют резистором $R_{ос}$ при помощи переключателя SA . Нижний предел измерений такого вольтметра 3...30 мВ, верхний 1В. Приведенная погрешность 1,6 %.

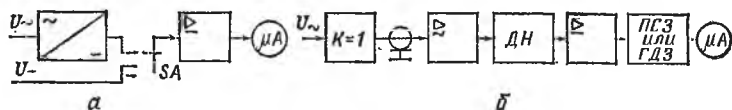


Рис. 6.6. Структурные схемы вольтметров переменного напряжения: a — универсального; $б$ — переменного напряжения среднего или действующего значения.

Вольтметры переменного напряжения имеют обычно структурную схему, приведенную на рисунке 6.6, a , в которую входят преобразователь амплитудного значения (ПАЗ), усилитель постоянного напряжения и магнитоэлектрический микроамперметр. Для измерения постоянного или переменного напряжения переключатель SA переводят соответственно в положения «—» и «~». Таким вольтметром, например типа В7, можно измерять амплитуду постоянного и переменного напряжений.

Схема ПАЗ выполнена в виде выносного пробника, это дает возможность выполнять измерения непосредственно у источника сигнала,

Для измерения среднего и действующего значения переменного напряжения вольтметры (ВЗ-34, ВЗ-38, ВЗ-39, ВЗ-40, ВЗ-42, ВЗ-45, ВЗ-46, ВЗ-48) выполняют по схеме, изображенной на рисунке 6.6, б.

Входной каскад (катодный повторитель K) выполняют в виде выносного пробника, связанного с прибором кабелем. Выбор предела измерений обеспечивается делителем напряжения $ДН$.

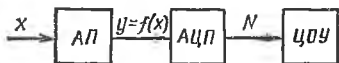
Вольтметры переменного напряжения градуируют обычно в действующих значениях синусоидального напряжения, в иных случаях на шкале прибора имеется соответствующее обозначение. Чем больше форма измеряемого напряжения отличается от синусоидальной, тем больше погрешность прибора.

6.6. Как классифицируются цифровые измерительные приборы? В чем их особенность?

Цифровыми называются измерительные приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации и представляющие показания в цифровой форме.

Цифровые измерительные приборы (ЦИП) включают аналоговый преобразователь $АП$ (рис. 6.7), изменяющий масштаб входной

Рис. 6.7. Структурная схема цифрового измерительного прибора.



величины x или ее преобразование в другую величину $y=f(x)$, более удобную для дальнейшей обработки, аналого-цифровой преобразователь $АЦП$, автоматически преобразующий непрерывную входную величину в цифровой код, и цифровое отсчетное устройство $ЦОУ$, преобразующее цифровой код в цифровые символы десятичной системы, удобные для визуального восприятия.

Различают ЦИП последовательного счета и поразрядного уравнивания. В ЦИП последовательного счета происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины с известной величиной. В ЦИП поразрядного уравнивания происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины с известной величиной, изменяющей свое значение неравномерными скачками по определенному алгоритму.

По роду измеряемой величины ЦИП разделяют на вольтметры, частотомеры, фазометры и т. д. Имеются также комбинированные ЦИП — мультиметры.

Различают ЦИП, показывающие мгновенные значения измеряемой величины и показывающие среднее значение за определенный промежуток времени, то есть интегрирующие. По области применения ЦИП подразделяют на лабораторные, системные и щитовые.

6.7. Какие основные характеристики цифровых приборов следует учитывать при их выборе?

К основным техническим характеристикам ЦИП относятся следующие: диапазон измерений, чувствительность, разрешающая способность, входное сопротивление, входной ток, точность, помехоустойчивость, быстродействие,

Обычно ЦИП имеют несколько диапазонов измерений, переключение которых осуществляется вручную или автоматически. На каждом поддиапазоне, кроме верхнего, предусматривается перегрузка, то есть допустимое превышение номинального значения поддиапазона при сохранении всех технических характеристик.

Чувствительность ЦИП определяется как значение измеряемой величины, приходящееся на единицу дискретности (один квант).

Разрешающая способность — величина, обратная количеству квантов N_q на поддиапазоне с учетом перегрузки, то есть N_q^{-1} .

Входное сопротивление $R_{вх}$ характеризует собственное потребление ЦИП от источника сигнала измерительной информации, оно влияет на относительную погрешность измерения

$$\delta \approx (R_{и}/R_{вх}) 100,$$

где $R_{и}$ — внутреннее сопротивление источника напряжения.

Для приборов переменного тока, кроме $R_{вх}$, в паспорте прибора указывается значение входной емкости $C_{вх}$.

Входной ток $I_{вх}$ также влияет на источник сигналов измерительной информации, его определяют как ток, протекающий между замкнутыми входными выводами ЦИП в отсутствие измеряемой величины. При измерении напряжения источника с высоким внутренним сопротивлением $R_{и}$ цифровым вольтметром вносится методическая погрешность $\Delta U = I_{вх} R_{и}$.

Точность ЦИП оценивается погрешностями, которые имеют методическую составляющую дискретности и погрешность, возникающую из-за несовершенства изготовления элементов и узлов прибора.

Для ЦИП, выпускаемых промышленностью, погрешность нормируется по формуле

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \right], \quad (6.3)$$

где δ — относительная погрешность в данной точке поддиапазона, %; c и d — постоянные числа, %; x_k — конечное значение измеряемой величины в данном поддиапазоне измерений; x — значение измеряемой величины.

Для некоторых ЦИП относительная погрешность нормируется по формуле

$$\delta = \pm \left[c' + d \frac{x_k}{x} \right],$$

где $c' = c - d$ и равно пределу допустимой приведенной погрешности.

Числа c и d выбирают из определенного ряда, предусмотренного ГОСТ 8.401—80.

Класс точности ЦИП обозначается c/d . Если ЦИП имеет несколько поддиапазонов, то и пределы допустимого значения основной погрешности могут нормироваться для каждого поддиапазона.

Способность ЦИП снижать влияние помех на результат измерений называется помехоустойчивостью, которая количественно характеризуется коэффициентом подавления помех

$$k = 20 \lg (E_{п, \max}/U_{\partial}),$$

где $E_{п. max}$ — амплитудное значение помехи на входе прибора; $U_э$ — эквивалентное входное постоянное напряжение, вызывающее такое же изменение показаний прибора, что и $E_{п. max}$.

Быстродействие ЦИП характеризуется длительностью одного цикла измерений $T_{ц}$ или числом измерений в секунду, а также продолжительностью установления показаний при скачкообразном изменении измеряемой величины. Этот показатель особенно важен, если ЦИП используется в измерительных информационных системах, где одним прибором проводится последовательный опрос нескольких измерительных информационных каналов.

Глава 7. САМОПИШУЩИЕ И РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

7.1. Как устроены и работают самопишущие приборы?

Самопишущие приборы отличаются от обычных измерительных приборов тем, что, кроме измерительного механизма обычно магнитоэлектрической или ферродинамической систем с указательной стрелкой, они имеют записывающий или регистрирующий механизм, представляющий собой лентопротяжный механизм и диаграммную ленту. Лентопротяжный механизм обеспечивает заданную скорость движения диаграммной бумаги, и, если к этой бумаге прижато перо с чернилами, связанное с указательной стрелкой, то на диаграммной бумаге может быть зафиксирован график изменения измеряемой величины во времени.

В зависимости от конструкции записывающего устройства самопишущие приборы бывают с непрерывной и точечной записью.

В приборах с непрерывной записью имеется мощный измерительный механизм 1 (рис. 7.1, а), связанный со стрелкой 2 и пером 3, которое постоянно касается диаграммной бумаги 4. Диаграммная бумага приводится в движение со строго постоянной скоростью от синхронного привода при помощи ведущего барабана 9, который через направляющие валики 4 и 6 наматывает ее на приемную катушку 7, постепенно сматывая с рулона 8. Если на измерительный механизм подается измеряемая величина (напряжение или ток), то стрелка прибора, а вместе с ней и перо, касаясь бумаги, оставляет на ней чернильный след в виде кривой, показывающей изменение измеряемой величины во времени. Эти приборы имеют большой тормозной момент и большие собственные потери. Последний недостаток устранен в приборах с точечной записью.

Особенность приборов с точечной записью состоит в том, что у них стрелка 10 (рис. 7.1, б) периодически при помощи дужки 11 и храпового устройства 15 прижимается к бумаге через пропитанную специальной чернильной пастой ленту 12, в результате чего на диаграмме 14 остается метка в виде точки 13 (или цифры в некоторых приборах). В следующее мгновение дужка приподнимается вместе со стрелкой над диаграммной лентой до следующего опускания и т. д. Такие приборы хороши не только меньшими потерями мощности, но и тем, что позволяют одновременно записывать до трех различных величин. Для этого в приборе установлены специальное переключающее устройство и сектор с тремя пленками, пропитанными пастой разных цветов.

Кроме рассмотренных самопишущих приборов, изготавливают приборы с записью на бумажном диске или на барабане, последние нашли широкое применение при записи температуры и влажности воздуха в течение суток или недели.

Некоторые регистрирующие приборы, так называемые двухкоординатные, например Н359, позволяют получать графики изменения одной измеряемой величины в функции другой измеряемой величины $y=f(x)$.

Регистрирующие приборы разделяют на самопишущие и быстродействующие самопишущие, последние предназначены для регист-

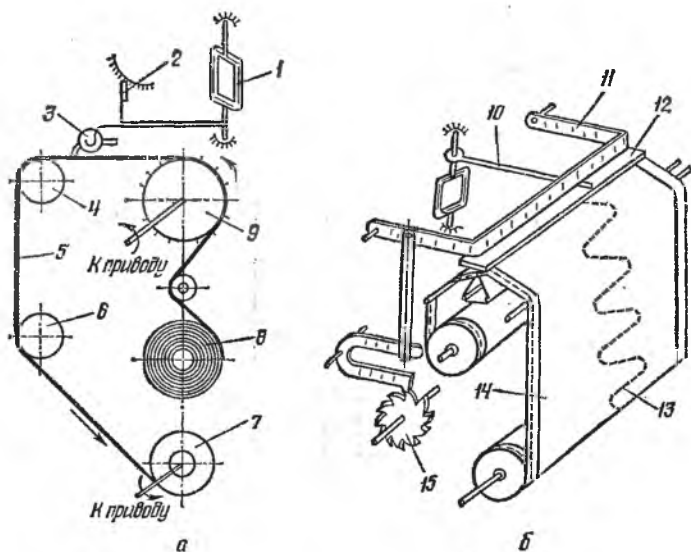


Рис. 7.1. Схемы устройства самопишущих приборов:
 а — с непрерывной записью; б — с точечной записью.

рации электрических величин, частота изменения которых превышает 1 Гц.

Регистрирующие приборы подразделяют также на приборы прямого действия (обычные самопишущие приборы, осциллографы) и приборы сравнения (автоматические мосты, потенциометры).

Самопишущие приборы находят все более широкое распространение для регистрации различных электрических величин и контроля за технологическими процессами сельскохозяйственного производства.

Для визуального наблюдения и записи величин, изменяющихся с частотами до 25 кГц, широко применяются светолучевые осциллографы, а для регистрации и наблюдения электрических величин с частотами, определяемыми несколькими мегагерцами, — электронно-лучевые осциллографы,

7.2. Как устроен и работает электронно-лучевой осциллограф?

Основная деталь электронного осциллографа — электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), в которой имеется так называемая электронная пушка, создающая направленный пучок электронов. Интенсивность потока и скорость движения электронов можно регулировать путем изменения накала нити 1 (рис. 7.2) катода 2, а также потенциалов управляющего анода 3, фокусирующего анода 4 и ускоряющего анода 5 при помощи потенциометров 8, 9, 10. На пути этого электронного пучка расположены две пары пластин или электродов: горизонтально отклоняющие пластины 7 (хотя они

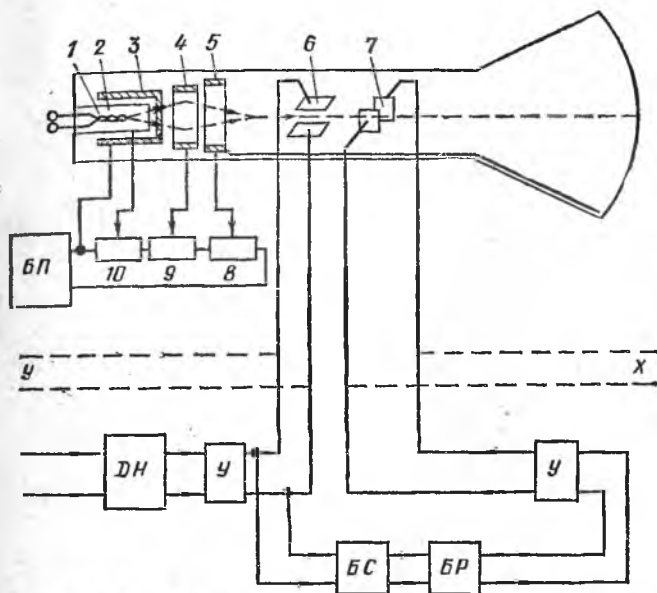


Рис. 7.2. Схема устройства электронно-лучевого осциллографа.

расположены вертикально, но луч отклоняют в горизонтальной плоскости экрана) и вертикально отклоняющие пластины 6.

К горизонтально отклоняющим пластинам осциллографа обычно подается так называемое пилообразное напряжение (рис. 7.3, а), полученное при помощи специального блока развертки БР и блока синхронизации БС. При помощи этих блоков можно изменять параметры пилообразного напряжения (U_{\min} , U_{\max} , t_0 , t_B). Так, при подаче напряжения (рис. 7.3, а) в момент времени, обозначенный на рисунке точкой 1, луч на экране осциллографа занимает крайнее левое положение. По мере увеличения напряжения от точки 1 до точки 2 происходит отклонение луча на экране с крайнего левого

положения в крайнее правое положение (рис. 7.3, б, верхняя ветвь). После достижения максимального значения напряжение, подаваемое на отклоняющую пластину, начинает быстро падать (участок 2—3 рис. 7.3, а). Это приводит к быстрому возврату луча в крайнее левое положение (рис. 7.3, б, нижняя ветвь). Как правило, время t_0 , в течение которого напряжение растет и отклоняет луч вправо, значительно больше времени уменьшения напряжения $t_в$ (возврата луча). Поэтому при низкой частоте развертки, то есть при самом большом времени t_0 , этот процесс можно очень хорошо наблюдать зрительно.

Можно наглядно представить, с какой скоростью может перемещаться по экрану луч. Даже при самой малой частоте напряжения развертки видно, как луч медленно перемещается слева направо и как быстро эта световая точка возвращается обратно. При помощи специального переключателя можно повысить частоту напряжения развертки в 10 раз, при этом световая точка быстрее перемещается по экрану, обратное перемещение ее визуально заметить уже трудно.

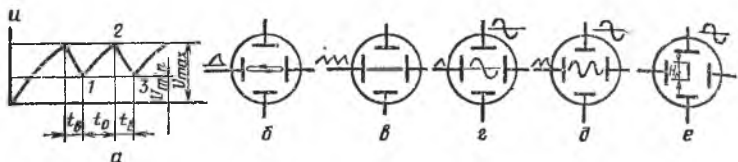


Рис. 7.3. Изображение на экране ЭЛТ осциллографа при подаче пилообразного напряжения (а):

б, в — только на горизонтально отклоняющие пластины; г, д — на горизонтальные и вертикально отклоняющие пластины; е — только на вертикально отклоняющие пластины.

Можно увеличить скорость перемещения луча еще в 10 раз, то есть в 100 раз по сравнению с начальной скоростью, далее в 1000, 10 000, в 100 000 и в 1 000 000 раз. При такой скорости перемещения луча глаз не успевает следить за перемещением точки и воспринимает этот процесс на экране осциллографа как прямую горизонтальную линию (рис. 7.3, в).

Если теперь на вертикально отклоняющие пластины подать какое-то, например переменное, напряжение, то оно, в свою очередь, будет отклонять луч в вертикальном направлении, то есть то вверх, то вниз. При подаче переменного напряжения той же частоты, что и напряжение развертки ($f_p = f_c$), на экране можно получить неподвижное изображение одного периода исследуемого напряжения, поданного на вертикально отклоняющие пластины (рис. 7.3, г).

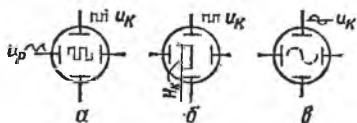
Если частота развертки f_p будет в два раза меньше частоты поданного напряжения f_c , то на экране наблюдатель увидит два периода синусоиды (рис. 7.3, д). Обратный ход луча может затемняться. Если частота развертки будет кратной частоте подаваемого напряжения, то изображение на экране будет неустойчиво или совершенно хаотично. Поэтому очень важно при работе с электронным осциллографом подобрать частоту подаваемого напряжения развертки f_p . Для этой цели можно грубо и плавно изменять f_p при помощи специального переключателя и синхронизирующего устройства. Если напряжение развертки не подавать, а на вертикально отклоняющие пластины подать переменное напряжение, то

на экране ЭЛТ наблюдатель увидит вертикальную полосу (рис. 7.3, е), причем размах полосы будет соответствовать двойной амплитуде подаваемого напряжения.

У каждого осциллографа есть возможность подавать на вертикально отклоняющие пластины калибровочное напряжение, то есть напряжение строго известной величины (1 В, 10 В, 100 В), частоты и формы (рис. 7.4, а). Если такое напряжение подать без напряжения развертки, то на экране появится вертикальная полоса (рис. 7.4, б). Размер этой полосы H_k можно изменять при помощи усилителя Y (рис. 7.2).

У некоторых осциллографов можно на изображение наложить метки определенной длительности (рис. 7.4, в). Длительность меток

Рис. 7.4. Изображение на экране ЭЛТ при подаче пилообразного и калиброванного (а), только калиброванного (б), пилообразного и исследуемого (в) напряжений.



Δt можно определить по специальному указателю. Поэтому, зная длительность и число меток n , уложившихся на периоде исследуемой величины, можно определить период $T = \Delta t n$, частоту $f = 1/T$ исследуемой величины и т. п.

7.3. Какие основные характеристики электронно-лучевых осциллографов необходимо учитывать при их выборе!

При выборе осциллографа для исследования процессов учитывают спектр исследуемого параметра, его амплитуду, мощность, источник сигнала, требуемую точность измерения. Наиболее важные характеристики осциллографа с точки зрения его применения следующие:

коэффициент отклонения $k_Y = 1/S_Y$ (мВ/см), где S_Y — чувствительность канала Y ;

полоса пропускания осциллографа, определяемая диапазоном частоты, в котором неравномерность амплитудно-частотной характеристики канала Y не превышает 30 %;

диапазон скоростей развертки;

входное сопротивление и входная емкость (обычно $R_{вх} = 0,5; 1; 10$ МОм; $C_{вх} = 10 \dots 50$ пФ) характеризует влияние осциллографа на режим работы исследуемой цепи;

погрешность измерений.

Осциллографы разделяют на четыре класса точности измерения напряжения и временных интервалов. Наиболее точные осциллографы первого класса имеют основную погрешность измерений не более 3 %, второго и третьего классов — соответственно 5 и 10 %, а наиболее простые приборы относятся к четвертому классу и имеют основную погрешность измерений до 12 %.

Точность измерений зависит от размеров рабочей части экрана, ширины луча и указывается для случая, когда размеры изображения занимают не менее 30 % размера экрана.

Современные универсальные осциллографы обладают полосой пропускания до 350 МГц, диапазоном амплитуды исследуемых сиг-

налов от милливольт до сотен вольт. По назначению и области применения универсальные осциллографы делятся на многофункциональные со сменными блоками (С1-70, С1-74, С1-91), широкополосные (С1-75, С1-92, С1-97), низкочастотные (С1-72, С1-76, С1-94), двухлучевые (С1-55, С1-69, С1-74), прецизионные (С1-108), полевые (С1-55, С1-65А, С1-82). Ряд осциллографов (С1-91, С1-91/3, С1-91/5, С1-91/6, СК-100, СК1-111) позволяет измерять частоту, ток, напряжение, сопротивление, температуру.

7.4. Как устроены и работают светолучевые осциллографы

Светолучевые, или электромеханические, осциллографы состоят из следующих основных частей: оптической, измерительной и регистрирующей.

Оптическая система позволяет от одной специальной лампы 1 (рис. 7.5, а) при помощи конденсорной линзы 2 и диафрагмы 3

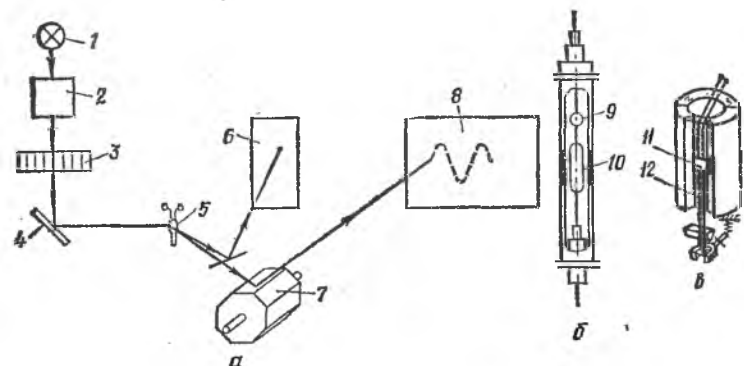


Рис. 7.5. Схемы устройства оптической системы светолучевого осциллографа (а), рамочного (б) и петлевого (в) гальванометров.

получить несколько самостоятельных лучей. Каждый луч, пройдя определенный путь, попадает на матовый экран 8 (одна его часть) и фотопленку или светочувствительную бумагу 6 (вторая часть луча). В результате на экране можно наблюдать светящуюся точку («зайчик»), оставляемую этим лучом. Светящуюся точку можно перемещать вверх, вниз или совсем выводить за пределы экрана при помощи зеркальца 4. Таким образом, на экране можно получить столько «зайчиков», на сколько частей делится исходный пучок света, идущий от лампы (обычно 6, 8, 12, может быть и 50).

Измерительная система состоит из набора специальных магнитоэлектрических гальванометров (вибраторов). Их можно в осциллографе установить столько, сколько самостоятельных лучей дает оптическая система прибора. При пропускании через гальванометр переменного тока подвижная часть его совершает колебания, которые передаются маленькому зеркальцу 9 или 11, расположенному на растяжке рамки 10 рамочного гальванометра (рис. 7.5, б) или на петле 12 петлевого гальванометра (рис. 7.5, в).

В результате колебания зеркала 5 (рис. 7.5, а) гальванометра происходит колебание зайчика на экране осциллографа (на фотопленке). При этом на экране осциллографа можно увидеть светлую вертикальную полосу, а на проявленной пленке — черную прямую линию (рис. 7.6, а). Размах H колебания светового луча на экране зависит от амплитуды поданного к гальванометру напряжения или тока, проходящего по рамке или петле вибратора.

Если зеркальный барабан 7 (рис. 7.5, а) заставить вращаться с постоянной угловой скоростью, кратной частоте подаваемого к гальванометру напряжения, то на экране осциллографа можно получить неподвижное изображение (развертку) поданного напря-

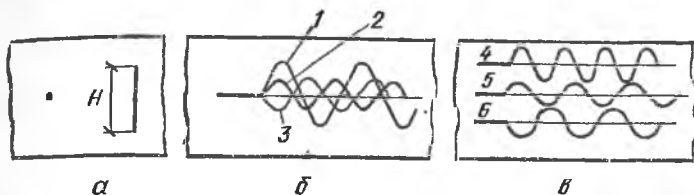


Рис. 7.6. Изображение на экране (осциллограмме) светолучевого осциллографа при неподвижном зеркальном барабане (бумаге) (а), подвижном барабане и синусоидальном входном сигнале (б, в).

жения, а если при этом будет двигаться фотопленка, то на ней после проявления получится кривая, или, как говорят, осциллограмма исследуемого напряжения.

Поскольку в осциллографе имеется несколько гальванометров, то, следовательно, одновременно можно подавать напряжение к каждому из них и на экране осциллографа увидеть сразу несколько кривых. При этом каждая кривая может иметь свою нулевую линию. Очень удобно для всех кривых иметь одну нулевую линию. Для этого используется один осциллографический гальванометр (ОГ). В этом случае до записи измеряемых величин все «зайчики» совмещают в одну точку (рис. 7.6, б). Подают к гальванометрам токи или напряжения и записывают их кривые 1, 2, 3 и т. д. (рис. 7.6, б). Иногда удобно кривые записать вразброс (рис. 7.6, в, кривые 4, 5, 6), но в этом случае трудно следить за сдвигом фаз между записанными величинами.

7.5. Что необходимо учитывать при выборе светолучевых осциллографов!

Промышленность выпускает большое число разнообразных осциллографов с регистрацией исследуемых сигналов на фотобумаге, фотопленке или носителе, чувствительном к ультрафиолетовым лучам. В большинстве светолучевых осциллографов используются осциллографические гальванометры-вставки (ОГ-вставки), представляющие собой подвижную часть магнитоэлектрического измерительного механизма, заключенную в металлический немагнитный кожух с полюсными наконечниками из магнетомягкого материала. Гальванометры-вставки помещают в воздушные зазоры магнитопровода одного большого магнита. Например, магнитный блок М1062 имеет в

магнитопроводе гнезда для размещения одновременно 12 осциллографических гальванометров.

При выборе ОГ-вставки учитывают его частотные свойства и чувствительность. Обычно при регистрации процессов, имеющих форму, близкую к треугольной, достаточно иметь рабочую полосу частот, соответствующую 3...5-кратной частоте основной гармоники регистрируемого процесса. При регистрации процессов, имеющих форму кривой, близкую к прямоугольной, рабочая полоса частот ОГ должна соответствовать 10...20-кратной частоте основной гармоники.

После выбора ОГ по частотным свойствам его окончательно выбирают с учетом чувствительности, амплитуды исследуемой кривой на носителе, например на фотопленке, и значений регистри-

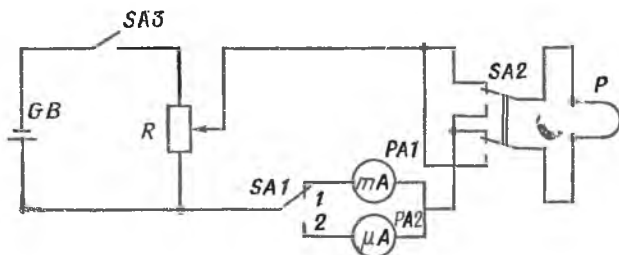


Рис. 7.7. Схема установки для определения чувствительности осциллографических гальванометров.

руемого измерительного сигнала. При этом часто применяют шунты, добавочные сопротивления или усилители.

В выпускаемых промышленностью ОГ действительные значения чувствительности S_Y и частоты собственных колебаний подвижной части гальванометра f_0 имеют большие отклонения от их значений, указанных в паспорте ОГ. Поэтому целесообразно перед применением выбранных ОГ для регистрации какого-либо процесса уточнить значения S_Y и f_0 .

Для определения фактической чувствительности осциллографического гальванометра P собирают схему по рисунку 7.7. Чувствительность определяют при токе, равном 0,75 значения градуировочного тока, указанного в паспорте ОГ. Значение тока устанавливают по миллиамперметру $PA1$, перемещая движок резистора R . При включенной развертке осциллографа определяют отклонение светового пятна на экране осциллографа в миллиметрах вначале при одном направлении тока I , затем при другом направлении (отклонения a_1 и a_2). Для переключения направления тока используют переключатель $SA2$.

Значение чувствительности подсчитывают по формуле

$$S_Y = (a_1 + a_2) / 2I.$$

Постоянная по току исследуемого ОГ

$$k_I = 1 / S_Y.$$

Если ОГ высокочувствительный, то переключатель $SA1$ переводят в положение 2,

Для определения рабочей частоты частот снимают амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) ОГ (рис. 7.8, а) при включенной развертке осциллографа. Вначале при синусоидальном напряжении с частотой $f_1 = (5\%) f_0$, устанавливаемой при помощи генератора синусоидальных колебаний G , добиваются отклонения светового пятна на экране в пределах от 40 до 50 мм. Поддерживая показание электронного вольтметра постоянным, увеличивают частоту напряжения и в 5—6 точках определяют отклонения светового пятна (a_m). По полученным данным строят АЧХ (рис. 7.8, б), где $v = a_m/a_{0m}$ — относительное отклонение светового пятна на экране; a_m — отклонение при заданной частоте; a_{0m} — отклонение при частоте f_1 .

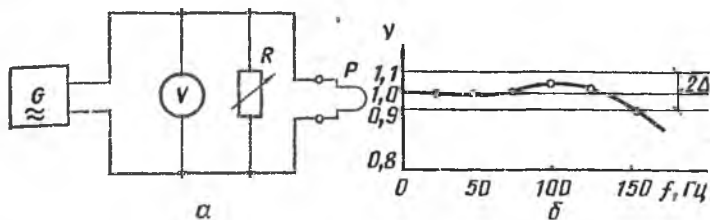


Рис. 7.8. Схема установки (а) для снятия амплитудно-частотной характеристики (б) осциллографических гальванометров.

На графике проводятся линии $v=1$ и $v=1 \pm \Delta$, где Δ — значение допустимой нелинейности АЧХ ОГ. Для ОГ с обмоточным успокоением $\Delta = \pm 5\%$, для ОГ с жидкостным и каркасным успокоением $\Delta = \pm 10\%$.

Первое пересечение АЧХ с линией $v=1+\Delta$ или $v=1-\Delta$ определяет верхнюю границу рабочей полосы частот. На графике рабочая частота составляет 0...150 Гц при $\Delta = \pm 5\%$.

Глава 8. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОСТЫ

8.1. Как устроены и работают одинарные мосты постоянного тока?

Одинарный мост постоянного тока состоит из трех образцовых резисторов (обычно регулируемых) R_1, R_2, R_3 (рис. 8.1, а), которые включают последовательно с измеряемым сопротивлением R_x в мостовую схему. К одной из диагоналей этой схемы подают питание от источника ЭДС GB , а в другую диагональ через выключатель $SA1$ и ограничивающее сопротивление R_0 включают высокочувствительный гальванометр PA .

Схема работает следующим образом. При подаче питания через резисторы R_x, R_1, R_2, R_3 проходят токи I_1 и I_2 . Эти токи вызовут в резисторах падение напряжений U_{AB}, U_{BC}, U_{AD} и U_{DC} . Если эти падения напряжения будут разными, то и потенциалы точек Φ_A, Φ_B и Φ_C будут неодинаковы. Поэтому, если выключателем $SA1$ включить гальванометр, то через него будет проходить ток, равный $I_g = (\Phi_B - \Phi_D)/R_0$.

Задача измеряющего заключается в том, чтобы уравновесить мост, то есть сделать потенциалы точек φ_B и φ_D одинаковыми, другими словами, уменьшить ток гальванометра до нуля. Для этого начинают изменять сопротивления резисторов R_1 , R_2 и R_3 до тех пор, пока ток гальванометра не станет равным нулю. При $I_G = 0$ можно утверждать, что $\varphi_B = \varphi_D$. Это возможно лишь тогда, когда падение напряжения $U_{AB} = U_{AD}$ и $U_{BC} = U_{DC}$. Подставив в эти выражения значения падений и напряжений $U_{AD} = I_2 R_3$, $U_{BC} = I_1 R_1$, $U_{DC} = I_2 R_2$ и $U_{AB} = I_1 R_x$, получим два равенства:

$$I_1 R_x = I_2 R_3;$$

$$I_1 R_1 = I_2 R_2;$$

разделив первое равенство на второе, получим

$$R_x/R_1 = R_3/R_2 \text{ или } R_x R_2 = R_1 R_3. \quad (8.1)$$

Последнее равенство есть условие балансировки одинарного моста. Из него следует, что мост сбалансируется тогда, когда произ-

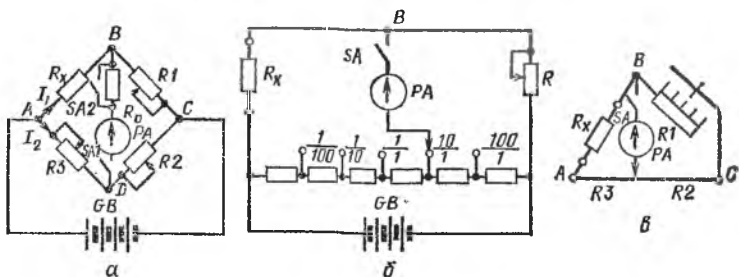


Рис. 8.1. Схемы одинарных мостов переменного тока:

a — общая; *б* — с плавным изменением отношения плеч; *в* — с плавным изменением отношения плеч и скачкообразным изменением плеча сравнения.

ведения сопротивлений противоположных плеч будут одинаковыми. Отсюда измеряемое сопротивление определится по формуле

$$R_x = R_1 R_3 / R_2.$$

В реальных одинарных мостах изменяют либо сопротивление резистора R_1 (его называют плечом сравнения), либо отношение сопротивлений R_3/R_2 . Есть мосты, у которых меняется только сопротивление плеча сравнения, а отношение R_3/R_2 остается постоянным. И наоборот, изменяется только отношение R_3/R_2 , а сопротивление плеча сравнения остается постоянным. Наибольшее распространение получили мосты, у которых плавно изменяется сопротивление R_1 , и скачками, обычно кратными 10, изменяется отношение R_3/R_2 (рис. 8.1, б), например, в распространенных мостах Р333.

Каждый мост характеризуется пределом измерений сопротивлений от R_{\min} до R_{\max} .

Важным параметром моста является его чувствительность

$$S_m = S_G S_{сх},$$

где $S_G = \Delta\alpha/\Delta I_G$ — чувствительность гальванометра; $S_{сх} = \Delta I_G/\Delta R$ — чувствительность схемы,

Подставляя S_{Γ} и $S_{СХ}$ в S_M , получим $S_M = \Delta\alpha / \Delta R$. Иногда пользуются понятием относительной чувствительности моста

$$S_M = \Delta\alpha / (\Delta R / R) = \Delta\alpha / \xi,$$

где ξ — относительное изменение сопротивления в измеряемом плече; $\Delta\alpha$ — угол отклонения стрелки гальванометра.

В зависимости от конструктивного оформления различают магазинные и линейные (реохордные) мосты. В магазинном мосте сопротивления плеч выполнены в виде штепсельных или рычажных многозначных мер электрических сопротивлений (магазинов сопротивлений), в реохордных мостах плечо сравнений делают в виде магазина сопротивлений, а плечи отклонения — в виде резистора, разделяемого ползунком на две регулируемые части (рис. 8.1, в).

По допустимой погрешности одинарные измерительные мосты постоянного тока имеют класс точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 1,0; 5,0. Числовое значение класса точности соответствует наибольшему допустимому значению относительной погрешности. Погрешность одинарного моста постоянного тока зависит от степени соизмеримости сопротивлений соединительных проводов и контактов с измеряемым сопротивлением. Чем меньше измеряемое сопротивление, тем больше погрешность. Поэтому для измерения малых сопротивлений применяют двойные мосты постоянного тока.

8.2. Как устроен двойной мост постоянного тока?

Плечами двойного (шестиплечевого, рис. 8.2) моста служат измеряемое сопротивление R_x (выполняют четырехзажимным для уменьшения влияния переходных контактных сопротивлений и включают в сеть через специальное четырехзажимное приспособление), образцовый резистор R_0 и две пары вспомогательных резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 .

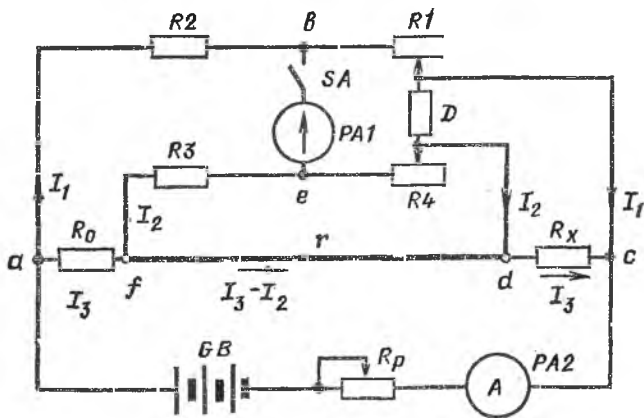


Рис. 8.2. Схема двойного моста постоянного тока,

Равновесие моста определяется формулой

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2} - \frac{r R_3}{r + R_3 + R_4} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_4}{R_3} \right), \quad (8.2)$$

Отсюда видно, что если два отношения плеч R_1/R_2 и R_4/R_3 равны между собой, то вычитаемое равно нулю. Несмотря на то, что сопротивления R_1 и R_4 , перемещая движок D , устанавливают одинаковыми, из-за разброса параметров сопротивлений R_2 и R_3 этого добиться очень сложно. Для уменьшения ошибки измерений надо сопротивление перемычки, соединяющей образцовый резистор R_0 и измеряемое сопротивление R_x , брать как можно меньшим. Обычно к прибору придается специальный калиброванный резистор r . Тогда вычитаемое выражения (8.2) практически становится равным нулю. Значение измеряемого сопротивления можно определить по формуле:

$$R_x = R_0 R_1 / R_2.$$

Двойные мосты рассчитаны на работу только с переменным отношением плеч.

Чувствительность двойного моста зависит от чувствительности нулевого указателя, параметров мостовой схемы и значения рабочего тока. С увеличением рабочего тока чувствительность увеличивается.

Наибольшее распространение получили комбинированные мосты постоянного тока, рассчитанные на работу по схемам одиарного и двойного моста.

8.3. В чем особенность мостов переменного тока!

Мост переменного тока собирают из трех переменных комплексов сопротивлений $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_3$ и измеряемого сопротивления \dot{Z}_x (рис. 8.3, а). Мост питается от источника переменного тока про-

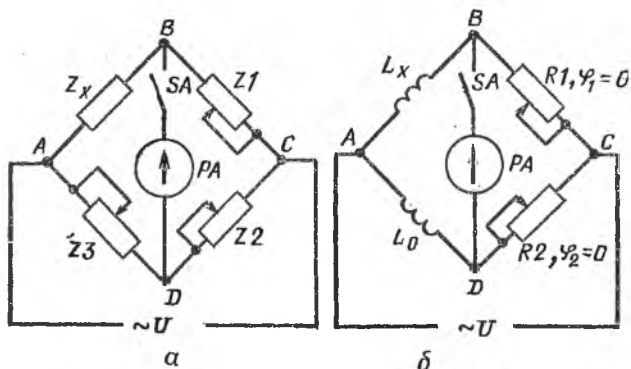


Рис. 8.3. Схема мостов переменного тока;
а — общая; б — для измерения индуктивности.

мышленной частоты, или внутри прибора устанавливают генератор переменного тока с частотой 1...10 кГц. В измерительную диагональ можно включать вибрационный гальванометр, электронный прибор, магнитоэлектрический гальванометр, предназначенный для работы в цепи переменного тока, его параметры согласуются с элементами моста.

В момент балансировки моста необходимо выполнять условие

$$\dot{Z}_x \dot{Z}_2 = \dot{Z}_1 \dot{Z}_3. \quad (8.3)$$

Уравнение равновесия моста в показательной форме записи имеет следующий вид:

$$Z_x Z_2 e^{j(\varphi_x + \varphi_2)} = Z_1 Z_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)}.$$

Два комплексных числа равны, когда у них равны модули и аргументы, то есть

$$Z_x Z_2 = Z_1 Z_3 \text{ и } \varphi_x + \varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_3. \quad (8.4)$$

Это и есть два условия балансировки мостов переменного тока. Из них следует, что при конструировании мостов переменного тока в качестве сопротивлений для двух любых плеч можно брать чисто активные сопротивления, а характер третьего плеча будет зависеть от характера измеряемого сопротивления.

Например, для измерения индуктивного сопротивления x_L или индуктивности L_x можно вместо комплексов \dot{Z}_1 и \dot{Z}_2 поставить два активных сопротивления, то есть $\dot{Z}_1 = R_1$; $\dot{Z}_2 = R_2$; $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$. Тогда из второго условия балансировки моста переменного тока видно, что

$$\varphi_x + \varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2 \text{ или } \varphi_x = \varphi_3.$$

В противолежащее плечо вместо комплекса \dot{Z}_3 нужно включить индуктивное образцовое сопротивление x_{L_0} или образцовую индуктивность L_0 (рис. 8.3, б).

8.4. Как работает автоматический мост!

Автоматический мост отличается от обычных мостов тем, что имеет линейный резистор с подвижным движком D (рис. 8.4). Часть резистора $r1$ включается в плечо с измеряемым сопротивлением R_x , а часть $r2$ добавляется к резистору $R2$. В двух других плечах моста включены постоянные резисторы $R3$ и $R4$. Мост питается от источника переменного напряжения. При подключении питания в диагонали $a-b$ моста появляется напряжение небаланса U_{ab} , которое через усилитель A поступает на обмотку управления LA специального двигателя M . Двигатель начинает работать и через систему передач перемещает движок D до тех пор, пока напряжение небаланса моста не станет равным нулю. Напряжение, подаваемое к обмотке управления, становится равным нулю, и двигатель перестает вращаться. По положению движка линейного потенциометра или по стрелке специального указателя можно судить о значении измеряемого сопротивления R_x . При изменении значения сопротивления R_x происходит новая разбалансировка моста.

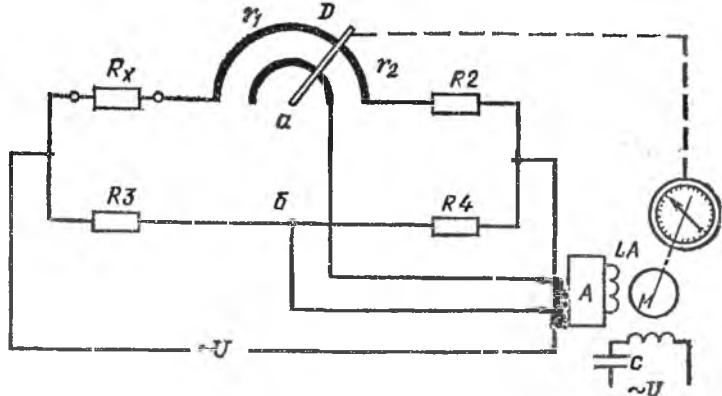


Рис. 8.4. Принципиальная схема автоматического моста переменного тока.

Напряжение небаланса через усилитель снова поступает на обмотку управления двигателя. В зависимости от знака напряжения, поступающего на обмотку управления, двигатель вращается либо в одном, либо в другом направлении. Режим подобран так, что движок линейного резистора перемещается в сторону, приближающую мост к сбалансированному состоянию до тех пор, пока не произойдет новой балансировки моста.

8.5. В чем особенность неуравновешенных мостов постоянного тока?

В практике измерения различных неэлектрических величин электрическими методами широко применяются неуравновешенные мосты постоянного тока. Их особенность заключается в том, что при подаче к измерительной схеме напряжения U в измерительной диагонали возникает напряжение небаланса. Мост не балансируется, а измеряется напряжение небаланса либо милливольтметром, либо микро- или миллиамперметром, включенными в измерительную диагональ. Задача сводится к тому, чтобы установить графическую зависимость измеряемой величины от абсолютного или относительного изменения измеряемого сопротивления, то есть $\alpha = f(\Delta R_x)$ или $\alpha = f(\Delta R_x / R_x)$. Таким образом по значению тока (или напряжения), вернее по углу α отклонения подвижной части прибора, включенного в измерительную диагональ, судят о значении измеряемой неэлектрической величины.

Чтобы отклонение указателя зависело только от изменения сопротивления плеча моста, необходимо либо иметь стабилизированное напряжение питания, либо в качестве измерителя использовать магнитоэлектрический логометр, у которого угол отклонения зависит не от напряжения источника питания, а только от отношения токов, протекающих по рамкам (см. п. 2.5).

9.1. Как устроен и работает потенциометр постоянного тока

Потенциометры (компенсаторы) применяют для измерения напряжений, токов, сопротивлений компенсационным методом, обеспечивающим высокую точность.

В потенциометре имеются образцовый R_0 и компенсационный R_k резисторы. Они включены последовательно. От вспомогательного источника ЭДС GB через них пропускают рабочий ток I_p (рис. 9.1). Значение рабочего тока устанавливают при помощи регулировочного реостата R_p путем сравнения падения напряжения в образцовом резисторе со значением ЭДС нормального элемента.

Для этого переключатель SA устанавливают в положение 1 и изменяют рабочий ток I_p до тех пор, пока ток в гальванометре не уменьшится до нуля. Это означает, что потенциал точки A стал равен потенциалу точки C , а потенциал точки B равен потенциалу точки D . Можно сказать, что падение напряжения в образцовом резисторе стало равно ЭДС нормального элемента $I_p R_0 = E_N$, и, следовательно, значение рабочего тока можно определить как $I_p = E_N / R_0$. Обычно рабочий ток небольшой и составляет порядка $1 \cdot 10^{-4}$ А. Потенциометр готов для работы.

Измеряемое напряжение U_x подают на клеммы E_x , переключатель SA ставят в положение 2. Как правило, в этот момент через гальванометр по цепи $E_x - r_k - PA - E_x$ проходит ток. Это значит, что падение напряжения, вызванное рабочим током в компенсационном резисторе, оказалось больше или меньше измеряемого напряжения. При помощи движка начинают изменять значение сопротивления компенсационного резистора r_k и тем самым изменять сравнимое падение напряжения $I_p r_k$ с измеряемым напряжением U_x . Движок перемещают до тех пор, пока ток, проходящий через гальванометр, не станет равен нулю. В момент полной компенсации (при втором положении переключателя), то есть в момент, когда ток гальванометра равен нулю, $I_p r_k = U_x$. Подставляя значение рабочего тока в эту формулу, получают значение измеряемого напряжения

$$U_x = E_N r_k / R_0.$$

В формулу входят две очень точные величины E_N и R_0 . Следовательно, точность измерений напряжения зависит от точности выполнения компенсационного резистора и от возможности плавного его изменения.

Схемы и конструкции компенсационных резисторов потенциометров предусматривают возможность непосредственного отсчета значений измеряемой ЭДС (напряжения). Для этого многозначные меры электрических сопротивлений, из которых состоит компенсационный резистор, градуируют в единицах падения напряжения.

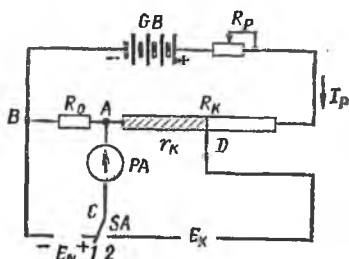


Рис. 9.1. Схема потенциометра постоянного тока.

Потенциометры постоянного тока выпускают двух типов: большого сопротивления и малого.

Для потенциометров первого типа сопротивление рабочей цепи составляет порядка 10 000 Ом на 1В, рабочий ток — 0,1 мА. Для них применяют гальванометры (см. п. 2.4) с относительно большим критическим сопротивлением. Верхний предел измерений ЭДС или напряжения 1,2 . . 2,5 В. Такие потенциометры нерационально применять для измерения малых ЭДС и напряжений, так как увеличивается погрешность измерения. Малые ЭДС и напряжения измеряют потенциометрами малого сопротивления с рабочим током 1; 10; 25 мА. Для них применяют гальванометры с небольшим критическим сопротивлением.

Точность измерений потенциометра зависит от точности значения ЭДС нормального элемента, точности значений компенсационного и образцового (установочного) резисторов и чувствительности гальванометра.

Класс точности потенциометра определяют по допустимым максимальным отклонениям показаний в процентах от номинального предела измерений и цены деления ступени декады наименьших значений.

Потенциометры изготавливаются классов точности 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1 и 0,2.

Формулы для расчета наибольших допустимых погрешностей показаний потенциометра и другие условия обычно указаны в паспорте и на щитке потенциометра.

9.2. В чем особенность потенциометров переменного тока?

В цепях переменного тока компенсационными методами выполнять измерения сложнее, чем в цепях постоянного тока, так как, чтобы уравновесить измеряемое переменное напряжение известным, необходимы равенство их численных значений, противоположность их фаз, равенство частот и одинаковая форма кривой их изменения.

Для достижения равенства частот потенциометр и измерительную цепь питают от одного источника переменного тока. Чтобы компенсирующее напряжение не зависело от измеряемого, между потенциометром и источником тока включают разделительный трансформатор. Одинаковые фазовые сдвиги компенсирующего и измеряемого напряжений можно получить, применив градуированный фазовращатель. Равенство амплитуд напряжений устанавливают при помощи делителя напряжения.

Для установки и поддержания рабочего тока в потенциометре переменного тока используют электродинамический амперметр класса 0,5 или 0,2. Поэтому в цепях переменного тока измерения компенсационным методом при помощи потенциометров менее точны.

По способу компенсации измеряемого напряжения потенциометры переменного тока подразделяют на полярно-координатные и прямоугольно-координатные.

Наибольшее распространение получили потенциометры прямоугольно-координатные (в основном и выпускаются промышленностью). Они имеют два переменных резистора $R1$ и $R2$ (рис. 9.2, а).

Резистор $R1$ питается от разделительного трансформатора $TV1$,

через него пропускается рабочий ток I_{p1} , который в каждой ступени резистора $R1$ вызывает падение напряжения ΔU_1 .

Резистор $R2$ включен во вторичную обмотку специального воздушного трансформатора $TV2$.

Воздушный трансформатор взят для того, чтобы рабочий ток I_{p2} был смещен по фазе относительно тока I_{p1} на 90° . В связи с этим падение напряжения в каждой ступени резистора $R2$ равно ΔU_2 и смещено от ΔU_1 на 90° .

Средние точки резисторов $R1$ и $R2$ соединены перемычкой H . Поэтому потенциалы этих средних точек O_1 и O_2 одинаковы.

Если теперь предположить, что движки резисторов $R1$ и $R2$ находятся на уровне точек O_1 и O_2 , то при подаче на выходные клеммы 1 и 2 измеряемого напряжения U_x в цепи гальванометра

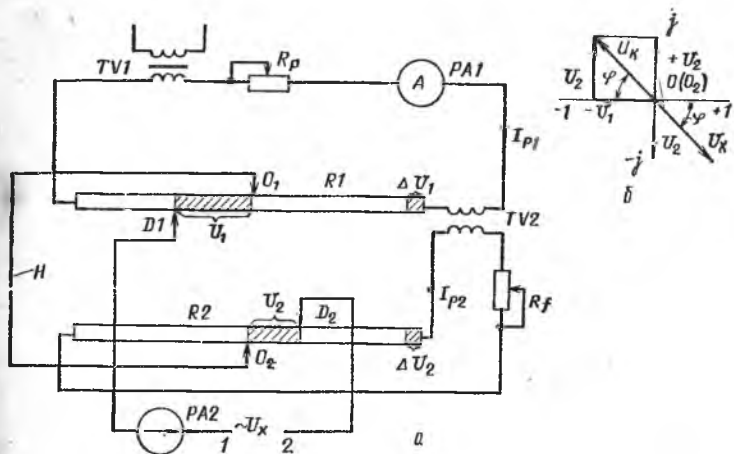


Рис. 9.2. Схема прямоугольно-координатного потенциометра переменного тока (а) и векторная диаграмма токов и измеряемых напряжений (б).

возникнет ток, так как сопротивление этой цепи практически равно нулю. Стрелка гальванометра будет иметь какое-то отклонение.

Перемещением движков $D1$ и $D2$ добиваются такого положения, когда $I_p = 0$, то есть полной компенсации измеряемого напряжения U_x при помощи двух падений напряжения $U_1 = I_{p1} r_{к1}$ и $U_2 = I_{p2} r_{к2}$. Обычно резисторы $R1$ и $R2$ отградуированы в единицах напряжения, то есть по ним можно сразу узнать значения U_1 и U_2 .

При измерении напряжения повышенной частоты тока ЭДС во вторичной обмотке воздушного трансформатора увеличивается, так как $E = 4,44 f \omega_2 \Phi_M$, следовательно, увеличивается и рабочий ток I_{p2} . Чтобы его сохранить постоянным, то есть сохранить градуировку резистора $R2$ в единицах напряжения, и служит добавочный резистор R_f .

Промышленность выпускает потенциометры переменного тока типов Р56/2, К509 и У5015.

Потенциометры переменного тока питают от сети переменного тока через понижающий разделительный трансформатор. Погрешность измерений достигает 0,3...0,5% (за счет погрешности амперметра).

9.3. Как работает автоматический потенциометр!

Перед измерением потенциометр необходимо настраивать. Дело в том, что напряжение батарей постепенно падает, поэтому уменьшается рабочий ток в плечах моста, в том числе и в резисторе R_4 (рис. 9.3). Для восстановления рабочего тока необходимо переключатель SA поставить в положение 1. Если падение напряжения в

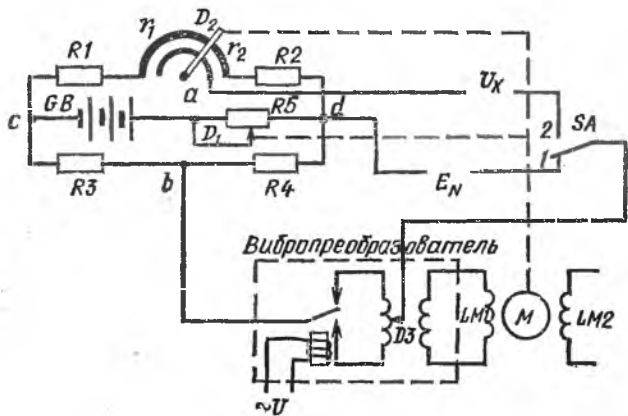


Рис. 9.3. Принципиальная схема автоматического потенциометра.

резисторе R_4 оказывается меньше ЭДС нормального элемента E_N , в цепи $E_N-c-b-d-E_N$ возникает ток. Этот ток, проходя через первичные обмотки трансформатора, находящегося в вибропреобразователе, наводит ЭДС во вторичной его обмотке. Под действием этой ЭДС по обмотке управления $LM1$ специального двигателя M проходит ток управления. Двигатель начинает работать и через систему передач приводит в движение движок $D1$ резистора R_5 , что вызывает изменение рабочего тока и падения напряжения в резисторе R_4 . Движок перемещается до тех пор, пока падение напряжения в резисторе R_4 не станет равным E_N . Так при помощи нормального элемента происходит настройка потенциометра.

После этого переключатель SA ставят в положение 2 и подают измеряемое напряжение U_x . Если это напряжение окажется больше или меньше напряжения небаланса моста U_{ab} , то в цепи вибропреобразователя опять будет проходить ток, обмотка управления двигателя получит питание. Двигатель начнет вращаться и перемещать уже движок $D2$ до полной остановки двигателя, то есть до полной компенсации измеряемого напряжения U_x напряжением небаланса моста U_{ab} .

Измеряемое сопротивление можно определить по положению движка потенциометра, отградуированного в единицах напряжения. Иногда на оси двигателя устанавливают специальное счетное устройство.

Промышленность выпускает потенциометры полуавтоматические (уравнивание осуществляется частично вручную) и автоматические. Погрешности мостов с автоматическим уравниванием находятся в диапазоне $\pm 1,5\%$.

Глава 10. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

10.1. Как можно преобразовать электрическое напряжение при помощи резисторов?

Самая простая и удобная схема преобразования напряжения — это схема с использованием резистора с подвижным движком (реостата) (рис. 10.1, а). На каждом реостате указывают номинальное

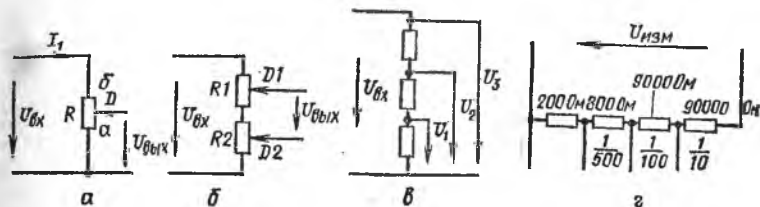


Рис. 10.1. Схемы включения резисторов для регулирования (а, б, в) и преобразования (г) напряжения.

сопротивление и наибольший длительно допустимый ток нагрузки. По этим параметрам выбирают реостат.

Если все сопротивление резистора R включить на напряжение сети $U_{вх}$, то, перемещая движок D резистора от точки a до точки b , можно плавно изменять напряжение на выходе $U_{вых}$ от 0 до $U_{вх}$. Такой преобразователь напряжения очень удобен.

Основной недостаток таких преобразователей, ограничивающий их применение маломощными цепями, — наличие подвижного контакта с его переходным сопротивлением.

Вторая схема преобразования подобна первой (рис. 10.1, б), но имеет два подвижных контакта. Схема позволяет очень плавно изменять напряжение на выходе от 0 до $U_{вх}$. Для этого один резистор берут с большим числом витков и большим сопротивлением, чем второй. Первый дает возможность грубо регулировать выходное напряжение, а второй — плавно.

Распространено преобразование напряжения при помощи образцовых постоянных резисторов, включенных последовательно в сеть на входное напряжение. От каждого резистора сделаны выводы, с которых можно снимать требуемое напряжение (рис. 10.1, в). Достоинство такой схемы преобразования напряжения — отсутствие переходных контактов, а поэтому возможно очень точное преобразова-

ние напряжений. На этом принципе работают делители напряжения, которые рассчитаны так, что позволяют на выходе сдвигать величину, меньшую, чем входное напряжение, в определенное число раз. Например, можно получить 1/10 часть этого напряжения, 1/100 или 1/500 ее часть (рис. 10.1, з).

Наиболее широкое применение делители напряжения получили в схемах с потенциометрами.

Недостатки схемы, изображенной на рисунке 10.1, в,— скачкообразное преобразование напряжения, наличие большого числа выходов и необходимость переключения одного из выходных проводов с контакта на контакт.

Подобным образом работают многопредельные добавочные резисторы, устанавливаемые обычно в комбинированных многопредельных магнитоэлектрических приборах.

10.2. Как можно преобразовать электрическое напряжение при помощи трансформаторов?

В цепи переменного тока для преобразования одного переменного напряжения в другое широко используются автотрансформаторы и измерительные трансформаторы напряжения.

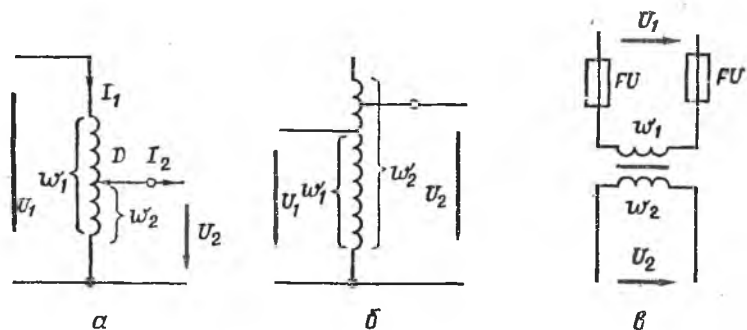


Рис. 10.2. Схем трансформаторных преобразователей напряжения: а, б — автотрансформатора; в — трансформатора напряжения.

Автотрансформаторы обычно имеют одну обмотку, расположенную на магнитопроводе. Все витки этой обмотки w_1 (рис. 10.2, а) являются витками первичной обмотки автотрансформатора и рассчитаны на определенное первичное напряжение (обычно 220В). Часть витков этой обмотки w_2 , отделяемая при помощи движка, является одновременно витками вторичной обмотки автотрансформатора. Если плавно изменять число витков во вторичной обмотке при помощи движка, то на выходе трансформатора можно изменять напряжение от 0 до U_1 , или от 0 до U_{\max} , которое может быть больше номинального (рис. 10.2, б). Например, при положении движка, как это показано на рисунке, $w_2 > w_1$, следовательно, напряжение на выходе U_2 больше напряжения на входе U_1 автотрансформатора.

Измерительный трансформатор напряжения состоит из маг-

нитопровода, на котором укреплены две катушки. Первичная обмотка имеет, как правило, большее число витков w_1 . Число витков рассчитывают так, чтобы эту обмотку можно было включить на определенное номинальное напряжение $U_{1н}$: 380; 500; 6000; 10 000 В и т. д. (рис. 10.2, в).

Вторичная обмотка имеет малое число витков w_2 , которое рассчитывают так, чтобы при номинальном первичном напряжении $U_{1н}$ на зажимах вторичной обмотки можно было получить номинальное вторичное напряжение $U_{2н}$, равное, как правило, 100 В.

Таким образом, измерительный трансформатор напряжения понижает напряжение, подаваемое к первичной обмотке, в определенное число раз. Отношение первичного номинального напряжения $U_{1н}$ к вторичному номинальному напряжению $U_{2н}$ получило название номинального коэффициента трансформации данного измерительного трансформатора напряжения:

$$k_{н. н} = U_{1н} / U_{2н}.$$

Каждый измерительный трансформатор напряжения характеризуется номинальным коэффициентом трансформации, который указан в паспортных данных.

Трансформаторы напряжения работают в режиме, близком к холостому ходу при постоянном первичном напряжении.

Промышленность выпускает стационарные трансформаторы напряжения классов точности 0,2; 0,5; 1,0 и 3 и лабораторные классов точности 0,05; 0,1; 0,2. Стационарные трансформаторы изготовляют одно- и трехфазными на номинальные первичные напряжения до сотни киловольт при вторичном напряжении 150, 100 и $100\sqrt{3}$ В. Они имеют одно значение коэффициента трансформации. Лабораторные трансформаторы напряжения имеют несколько значений коэффициента трансформации, чаще всего бывают переносные.

Трансформаторы напряжения на высокие напряжения изготовляют масляными.

10.3. Как можно преобразовать ток при помощи резисторов! Что такое шунт!

Самый простой преобразователь тока — резистор с переменным сопротивлением, включенный последовательно в цепь измеряемого тока. Путем изменения положения движка можно плавно и в больших пределах изменять измеряемый ток. Однако эта схема имеет существенный недостаток, связанный с тем, что из-за наличия переходного контакта точность измерения невысокая.

Широко применяются преобразователи тока в виде шунтов. Шунт представляет собой резистор, включенный параллельно с измерительным механизмом в цепь измеряемого тока. На рисунке 10.3, а показан однопредельный шунт, значение падения напряжения на шунте можно определить из уравнения

$$U = I_{ш} R_{ш} = I_A R_A = I_x R_{ш} R_A / (R_{ш} + R_A).$$

Тогда значение измеряемого тока можно определить из выражения

$$I_x = I_A \frac{R_{ш} + R_A}{R_{ш}} = I_{AP},$$

где $p = I_x / I_A = (R_{ш} + R_A) / R_{ш}$ — коэффициент шунтирования, показывающий, во сколько раз измеряемый ток больше допустимого тока амперметра.

Обычно значение коэффициента шунтирования известно или им задаются, тогда необходимое для преобразования тока значение сопротивления шунта можно определить по формуле

$$R_{ш} = R_A / (p - 1).$$

Этой формулой широко пользуются при расчете сопротивлений шунтов. Зажимы шунта, к которым подводят ток, называют токовыми, а выходные, с которых снимают напряжение, — потенциальными, к последним подсоединяют измерительный прибор.

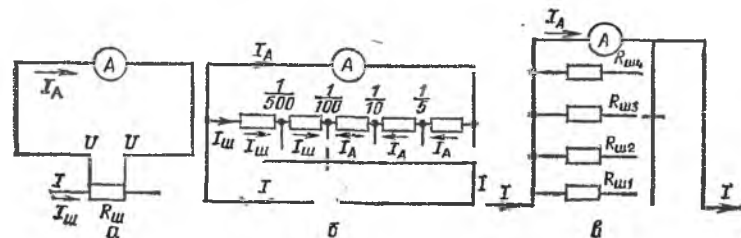


Рис. 10.3. Схемы включения шунтов:
а — однопредельного; б, в — многопредельного.

Шунты на ток до 30 А обычно встраивают в корпус прибора, шунты на большие токи обычно бывают наружные.

Шунт характеризуется номинальными значениями входного тока I_n и выходного напряжения U_n . Их отношение определяет номинальное сопротивление шунта.

Кроме однопредельных шунтов, часто пользуются многопредельными шунтами, которые выполнены по схемам, приведенным на рисунках 10.3, б и в.

10.4. Как устроен и работает измерительный трансформатор тока!

Измерительный трансформатор тока состоит из стержневого или кольцевого магнитопровода, набранного из тонких изолированных листов высокосортной трансформаторной стали. На одном стержне намотана первичная обмотка, как правило, выполненная из толстого провода и с малым числом витков w_1 (иногда это может быть просто стержень — 1 виток) (рис. 10.4).

Вторичная обмотка имеет обычно большее число витков w_2 , которое рассчитывают таким образом, чтобы при подключении к ней амперметра, то есть прибора с очень малым внутренним сопротивлением, номинальный ток в ней составил бы 5 А.

Трансформатор работает следующим образом. При прохождении по первичной обмотке тока I_1 в ней создается намагничиваю-

щая сила $I_1 w_1$, которая вызывает в сердечнике появление переменного магнитного потока Φ_1 . Этот поток, пропуская витки вторичной обмотки, наводит в ней ЭДС E_2 , а следовательно, и ток I_2 (если подключен прибор). Ток, в свою очередь, создает намагничивающую силу $I_2 w_2$ и свой магнитный поток Φ_2 . Так как, согласно закону Ленца, этот поток направлен навстречу потоку Φ_1 , результирующий магнитный поток в сердечнике трансформатора небольшой. Поэтому во вторичной обмотке наводится небольшая ЭДС, которая вызывает появление сравнительно небольшого вторичного тока I_2 практически при замкнутой накоротко вторичной обмотке.

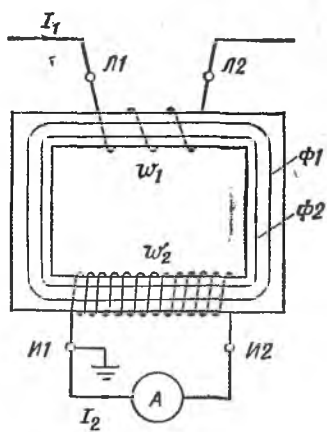


Рис. 10.4. Схема включения измерительного трансформатора тока.

Таким образом, трансформатор тока нормально работает в режиме короткого замыкания и не допускает работы вхолостую.

В зависимости от области применения трансформаторы тока изготавливают стационарными, как правило, с одним пределом измерений, или переносными многопределными.

При работе с измерительными трансформаторами тока необходимо следить за тем, чтобы вторичная обмотка при подключенной первичной не оставалась разомкнутой.

10.5. Почему вторичную обмотку трансформатора тока нельзя оставлять разомкнутой?

Вторичную обмотку трансформатора тока нельзя оставлять разомкнутой, если по первичной обмотке проходит измеряемый ток, по следующим причинам.

При размыкании вторичной цепи, что может быть, например, при отключении амперметра, исчезает встречный магнитный поток Φ_2 (рис. 10.4), следовательно, по сердечнику начинает проходить большой переменный поток Φ_1 , который вызывает наведение большой ЭДС во вторичной обмотке трансформатора (до тысячи вольт), так как вторичная обмотка имеет большое число витков. Наличие такой большой ЭДС нежелательно потому, что это опасно для обслуживающего персонала и может привести к пробое изоляции вторичной обмотки.

При возникновении в сердечнике большого потока Φ_1 в самом сердечнике начинают наводиться большие вихревые токи, сердечник начинает сильно нагреваться, и при длительном нагреве может выйти из строя изоляция обеих обмоток трансформатора. Поэтому надо помнить, что, если надо отключить измерительные приборы, то необходимо сначала замкнуть либо вторичную, либо первичную обмотку трансформатора.

У некоторых трансформаторов тока для этой цели предусмотрены специальные устройства (гнезда со штекерами, перемычки и т. д.); если таких устройств нет, то необходимо их сделать самим.

Глава 11. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

11.1. Какие бывают преобразователи неэлектрических величин в электрические?

При измерении различных неэлектрических величин возникает необходимость в преобразовании измеряемой величины x в пропорциональную электрическую величину y (напряжение или ток), которая и измеряется известным способом.

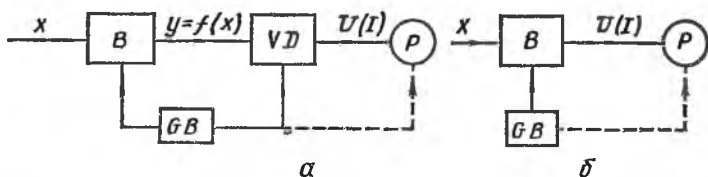


Рис. 11.1. Структурная схема преобразователей неэлектрических величин в электрические:

а — параметрического; б — генераторного.

Промежуточная величина y обычно при помощи мостовой электрической схемы преобразуется в напряжение или ток, которые измеряют электрическим прибором P . Часто для питания преобразователя (датчика), электрической схемы и самого прибора используют источник питания GB (рис. 11.1, а).

Различают два типа преобразователей: генераторные и параметрические. Генераторные преобразователи на выходе дают непосредственно напряжение или ток (рис. 11.1, б). К ним относятся индукционные преобразователи, пьезоэлектрические, термоэлектрические, фотоэлектрические, датчики Холла и др.

Параметрические преобразователи преобразуют неэлектрическую величину в электрическую (сопротивление, индуктивность, емкость, частоту), функционально зависящую от измеряемой величины. Эта электрическая величина при помощи электрической схемы преобразуется в напряжение или ток. К параметрическим датчикам можно отнести индуктивные, реостатные, проволочные, емкостные, фотосопротивления, термосопротивления и т. п.

11.2. Как устроены и работают индукционные преобразователи?

Простейшим индукционным преобразователем может служить любой генератор постоянного или переменного тока. Например, в генераторе постоянного тока с параллельным или независимым воз-

буждением при вращении якоря в магнитном поле наводится ЭДС, значение которой зависит от частоты вращения и значения магнитного потока. Если в таком генераторе установлен постоянный магнит или электромагнит с постоянной магнитной индукцией, то ЭДС зависит только от частоты вращения якоря ω . Поэтому при помощи такого преобразователя легко измерять частоту вращения различных электрических и рабочих машин. Приборы, построенные на таком принципе, получили название электрических тахогенераторов (рис. 11.2, а).

Индукционный датчик реагирует на изменение магнитного потока. Например, при вращении постоянного магнита (рис. 11.2, б) в катушке наводится ЭДС, ее можно зафиксировать на осциллографе или измерить вольтметром. По значению этой ЭДС судят о частоте вращения постоянного магнита.

При приближении ферромагнитной пластинки 1 (рис. 11.2, в) к воздушному зазору в магнитопроводе 3 генератора магнитный по-

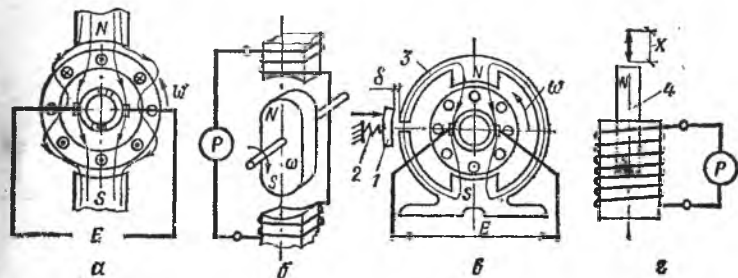


Рис. 11.2. Схемы индукционных преобразователей:

а — с неподвижным магнитом; б — с подвижным магнитом; в — с переменным магнитным потоком; г — с вибрирующим магнитом.

ток Φ увеличивается. Следовательно, увеличивается и ЭДС. При помощи такого датчика можно измерять, например, силу F , с которой ферромагнитная пластинка притягивается к зазору, преодолевая сопротивление пружины 2.

При помощи датчика, изображенного на рисунке 11.2, г, можно измерять вибрацию постоянного магнита 4. По закону Ленца, или закону электромагнитной индукции, при колебании магнита в катушке наводится ЭДС, а по ее значению и частоте колебаний можно судить о вибрации.

11.3. Что такое датчик Холла и для чего его можно применять?

Если взять пластинку из проводникового материала, поместить ее в магнитное поле с напряженностью H и пропустить через нее ток I , то на выходе датчика появится разность потенциалов, или напряжение U_x . Значение этого напряжения зависит от произведения напряженности магнитного поля H и тока I :

$$U_x = kHI.$$

Следовательно, при помощи такого датчика можно измерять напряженность магнитного поля и все другие неэлектрические величины, которые могут влиять на значение напряженности магнитного поля.

При постоянной напряженности магнитного поля значение измеряемого напряжения зависит от значения проходящего тока. Значит, при помощи датчиков Холла можно измерять те неэлектрические величины, которые могут вызывать изменения тока в электрической цепи. В цепь этого тока можно включать термосопротивление. Тогда при изменении температуры будет изменяться сопротивление, а следовательно, ток I в сети. Это приведет к изменению напряжения на выходе датчика Холла. При помощи образцовых приборов всегда можно отградуировать шкалу измерительного прибора в нужных единицах измерения (в единицах температуры и т. п.).

11.4. Как устроен и работает фотоэлектрический преобразователь!

Фотоэлектрические преобразователи работают на принципе фотоэлектрического эффекта. Известно, что, если некоторые материалы (цезий, сурьма, селен и др.) освещать, то в цепи такого элемента возникнет так называемый фототок.

Значение фототока, как правило, очень мало, но прямо пропорционально падающему на элемент световому потоку. Этим свойством фотоэлементов пользуются при измерении не только светового потока, электрической освещенности, но и для измерения целого ряда неэлектрических величин, которые прямо или косвенно могут воздействовать на световой поток.

Например, если на пути светового потока, падающего на фотоэлемент, установить прозрачный сосуд с жидкостью, прозрачность которой зависит от концентрации некоторого вещества, то по значению фототока можно косвенно судить о концентрации этого вещества. Фотоэлектрическим преобразователем можно легко измерять различные линейные или угловые перемещения, если при помощи перемещающейся пластинки или флажка будет постепенно перекрываться часть падающего светового потока.

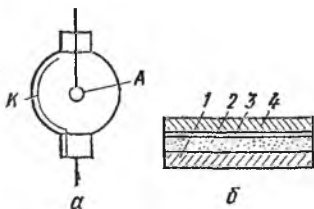


Рис. 11.3. Фотоэлектрические преобразователи с внешним (а) и с внутренним (б) фотоэффектом.

специальный катод, покрытый цезием или сурьмой, и анод. При попадании между ними светового потока возникает фототок (рис. 11.3, а). К ним относятся фотоэлементы типов ЦГ-1, ЦГ-3, ЦВ-1, СЦВ-3 и др.

Получили распространение полупроводниковые фотоэлементы. Обычно они состоят из металлической основы 1 (рис. 11.3, б), на которую нанесен слой селена 2, сверху тонкий слой золота 4,

а между ними запирающий слой 3. Такой элемент при попадании на него светового потока (квантов света) способен на выходе дать фото-ЭДС. На этом принципе работают солнечные батареи. По значению фото-ЭДС можно судить об интенсивности светового потока.

Отечественная промышленность выпускает селеновые полупроводниковые элементы марок К-5, К-10, К-20, сернисто-серебряные марок ФЭСС-У-2, ФЭСС-У-3 и др. Чувствительность фотоэлементов от 0,25 до 10 мА/лм. Возникающая в них ЭДС достигает 150 мВ.

Удобны для преобразования различных неэлектрических величин в электрические фоторезисторы, фотодиоды и фототриоды. Промышленность выпускает фотосопротивления ФС-АО, ФС-А1, ФС-62, ФС-К1, ФС-Д1 и др., рассчитанные на рабочие напряжения 4. . 40, 30. . 60, 110. . 220, 200 В.

Из фотодиодов можно отметить ФД-1, ФД-2, ФДК-1 с рабочими напряжениями соответственно 15, 30, 20 В и чувствительностью 0,02; 0,01; 0,003 мА/лм.

Фототриод ФТ-1 имеет рабочее напряжение 3 В и чувствительность 0,17 мА/лм.

11.5. Как работают пьезоэлектрические преобразователи

Некоторые кристаллические вещества и поляризованные керамики (сегнетоэлектрики) под действием механических напряжений или деформаций поляризуются. На их поверхности появляются избыточные заряды, которые исчезают при снятии напряжений или деформаций, и диэлектрик снова возвращается в исходное положение. Это так называемые пьезоэлектрики. Если же пьезоэлектрик поместить в электрическое поле, то он деформируется.

Значение избыточного заряда прямо пропорционально силе, действующей на кристалл:

$$Q = kF,$$

где k — пьезоэлектрический коэффициент преобразователя, зависящий от выбранного материала и направления действия силы; F — сила, действующая на пьезоэлемент.

При действии силы F вдоль одной оси (допустим, оси x) на поверхности пьезоэлемента возникают избыточные заряды одного знака (продольный эффект). При действии силы вдоль другой оси (допустим, оси y) знак избыточных зарядов, возникающих на тех же поверхностях, изменяется на противоположный (поперечный эффект). Кроме того, если на такой элемент действовать одновременно со всех сторон (гидростатическое сжатие или температурное расширение), то поляризации кристалла не возникает. Не наблюдается появление избыточных зарядов и при силе, действующей вдоль так называемой оптической оси z , которая перпендикулярна осям x и y .

Количество зарядов, возникающих на гранях кристаллов при продольном и поперечном пьезоэффектах, неодинаково. Оно зависит как от площади поверхности кристалла, на которой возникают заряды, так и от площади, на которую действует сила F .

Выбор материала для изготовления пьезоэлектрического преобразователя зависит не только от значения пьезоэлектрического коэффициента k , но и от механической прочности, предъявляемой к

преобразователю, а также от температуры, в которой ему придется работать.

По значению полученного на выходе напряжения и можно судить о давлении. Напряжение на выходе пьезоэлемента обычно мало, поэтому используют различные усилители, что ограничивает применение пьезоэлементов.

11.6. В чем особенность термоэлектрических преобразователей? Как устроены термоэлектрические термометры!

Термоэлектрические преобразователи (термопары) состоят из двух разнородных материалов с одной общей точкой, называемой точкой спаивания. При нагреве точки спаивания в термопаре наводится термо-ЭДС, значение которой прямо пропорционально разности температур точки спаивания $T_{сп}$ и свободных концов $T_{св}$ и зависит от материалов, из которых изготовлена термопара:

$$e_t = k_m (T_{сп} - T_{св}) = k_m \Delta T,$$

где k_m — коэффициент, зависящий от материала термопары; ΔT — разность между температурами точки спаивания и свободных концов.

Промышленность выпускает стандартные термопары типа ТХА, ТХК, ТПП. Название ТХА означает, что положительный электрод выполнен из хромеля, а отрицательный — из алюмеля.

Для термопар составлены специальные градуировочные таблицы и градуировочные графики (рис. 11.4), по которым, зная ЭДС, можно определить ΔT .

Если под рукой нет стандартной термопары, то ее можно изготовить самим, выбрав соответствующие подручные материалы. Для этого можно воспользоваться следующими значениями термо-ЭДС (при $\Delta T = 100^\circ$ в паре с платиной):

Материал	Термо-ЭДС, мВ	Материал	Термо-ЭДС, мВ
Нихром	+2,2	Константан	-3,4
Магнанин	+0,76	Копель	-3,6
Медь	+0,76	Никель	-1,5
Хромель	+2,4	Алюмель	-1,7

Это значит, что, если один проводник выполнить из меди, а другой из алюмеля, то при разности температур $\Delta T = 100^\circ$ будет наводиться термо-ЭДС, равная $e_t = 0,76 + 1,76 = 2,52$ мВ. В термопаре из хромеля и константана $e_t = 2,4 + 3,4 = 5,8$ мВ и т. д., то есть при

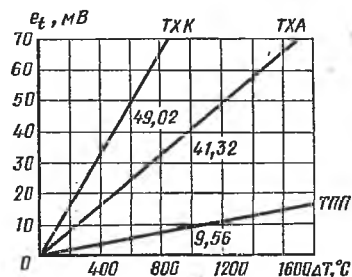


Рис. 11.4. Графики зависимости термо-ЭДС от температуры точки спаивания при $T_{сп} = 0^\circ\text{C}$.

выборе материала желательны один материал брать с положительной термо-ЭДС, а другой — с отрицательной.

Термопара не является самостоятельным прибором, а используется вместе с вторичным прибором (милливольтметром, потен-

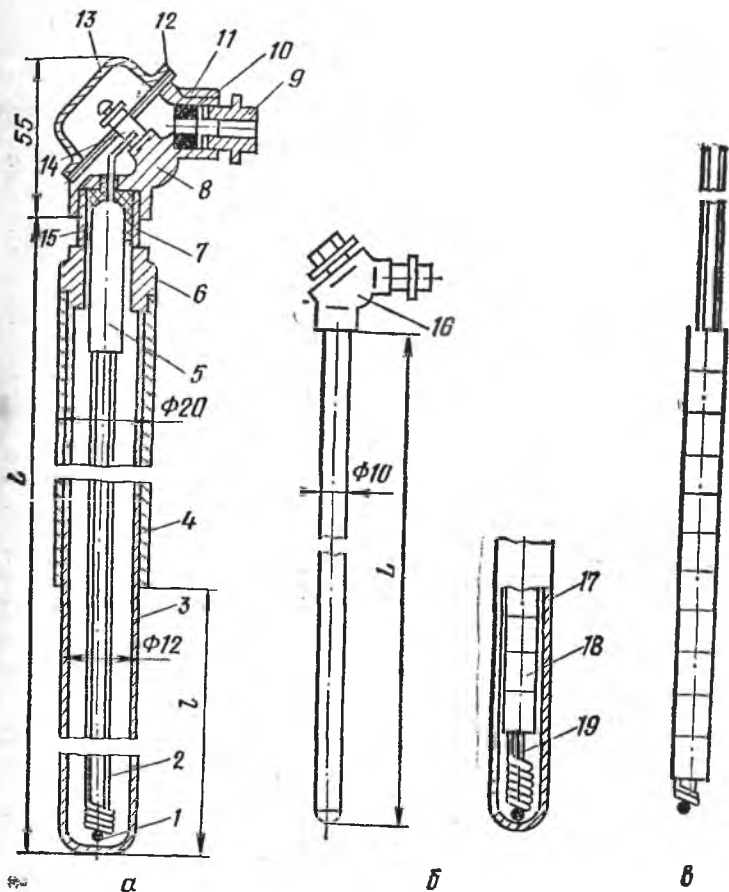


Рис. 11.5. Термоэлектрические термометры типа
 а — ТПП-0555; б — ТХА-0515; в — ТПП-1378.

циометром). Такой прибор называется термоэлектрическим термометром. Рассмотрим устройство некоторых из них.

Промышленные термоэлектрические термометры типа ТПП-0555 устроены следующим образом (рис. 11.5, а). Термоэлектроды, образующие рабочий конец 1, изолированы по длине фарфоровыми трубками 2 и б и помещены в защитный чехол 3 из алунда (99% Al_2O_3 и TiO_2), рассчитанный на атмосферное давление. Для прида-

11.2. Основные технические характеристики термоэлектрических термометров

Тип	Градуировка	Пределы измерений, °С	Монтажная длина, мм	Тепловая инерционность, °С	Область применения
ТХК-529	ХК	0...400	160...500	10; 40	Измерение температуры жидких, газообразных сред, не разрушающих арматуру
ТХА-0515	ХА	-50...600	12...2000	10; 40	То же
ТХК-0515	ХК	-50...600	120...2000	10; 40	»
ТХК-0806 ТХА-0806	ХК ХА	0...600	120...3150	210	»
ТХКП-ХУШ	ХК	0...400	100	210	Измерение температуры поверхностей нагревателей, печей, теплоизоляции
ТХК-834	ХК	0...400	До 9000	Не нормируется	Измерение температуры почвы, тел животных, технологического оборудования
ТХА-1479	ХА	0...750	100...400	60	То же
ТХК-1479	ХК	0...600		60	»
ТХКП-551	ХК	0...600	100...400	210	»
ТХК-0379-01	ХК	-50...400	10...320	5	»

Примечание. $R_{вн}$ — внешнее сопротивление милливольтметров, равное 0,6; 5 или 15 Ом. Длина монтажной части 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 60; 80; 100; 120; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 3150 мм.

ния чехлу дополнительной прочности часть его заключена в стальную трубку 4. При помощи стальных трубок 6 и 7 защитный чехол соединен с корпусом водозащитной бакелитовой головки 8 с укрепленными в ней двумя зажимами 14, к которым припаяны концы электродов. Головка уплотнена герметизированной мастикой 15 и имеет съемную крышку 13 и уплотнение 12. Штуцер 9 с уплотнением 10 служат для вывода из головки соединительных проводов. На головке укрепляется табличка 11 с указанием на ней типа термомпары, максимальной допустимой температуры, давления и т. п.

Монтажная длина L термометра изменяется в пределах от 320 до 2000 мм, а погружаемая l — от 200 до 500 мм.

Термометры типа ТХА-0515 устроены проще (рис. 11.5, б) и состоят из защитного чехла 17, в котором размещаются термоэлектроды 19, изолированные двухканальными фарфоровыми бусами 18. Концы термоэлектродов и выводы соединительных проводов соединяют в бакелитовой головке 16.

Для измерения температуры газовых сред в лабораторных условиях при атмосферном давлении используют термометры без защитных чехлов и головки типа ТПП-1378 (рис. 11.5, в). Их термоэлектроды изолированы двухканальными фарфоровыми бусами наружным диаметром 2,5 мм, кроме рабочего конца.

Основные технические характеристики ряда термоэлектрических термометров, используемых в сельском хозяйстве, приведены в таблице 11.2. При выборе термоэлектрических термометров следует учитывать диапазон измеряемых температур, характер окружающей среды (влажность, химически активная среда некоторых помещений), способ крепления.

Термоэлектрические термометры работают в комплекте с магнитоэлектрическими милливольтметрами типа МВ1-0,2; М-64; МР-64-2; М-1730; М-1731 — с регулирующим устройством; МР264-0,2 — с двухдиапазонным регулирующим устройством; с потенциометрами КСП2, КСП3, КСП4; с автоматическими приборами следящего уравнивания, например типа А542-601, А543-401, А502-301, А502-308, которые позволяют не только измерять значение температуры с высокой точностью $\pm 1,0\%$, но и записывать изменение температуры во времени на диаграммной ленте.

11.7. Как устроены термометры сопротивления (терморезисторы)? Какие термометры сопротивления используют в измерительной технике!

Термометр сопротивления состоит из термопреобразователя (терморезистора), защитного чехла и соединительной головки. Терморезистор может быть металлическим, зависимость его сопротивления от температуры имеет вид прямой 1 на рисунке 11.6, или полупроводниковым — кривая 2.

Чувствительный элемент металлического термометра сопротивления представляет собой обмотку на теплостойком изоляционном каркасе из тонкой медной (рис. 11.7, а), платиновой, вольфрамовой или молибденовой проволоки.

Например, в платиновых термосопротивлениях чувствительный элемент представляет собой платиновую спираль 3 (рис. 11.7, в), расположенную в многоканальной фарфоровой капиллярной трубке 4, заполненной керамическим порошком 5, который одновременно изо-

лирует и поддерживает спираль. К концам спирали припаяны выводные провода 1. С торцов трубка плотно закрыта пробками 2 и 6.

Чувствительный элемент вставляется в защитный чехол, изготовленный из стали, выводы элемента подведены к контактной головке с зажимами для подключения к измерительной схеме (рис. 11.7, б). Чувствительный элемент полупроводникового термометра сопротивления выполнен в виде шайбы или бусинки из полупроводникового металла (медно-марганцевые, кобальто-марганцевые порошки с добавками).

Наибольшее распространение для измерения и регулирования температуры получили терморезисторы типа КМТ и ММТ.

Цилиндрические терморезисторы типов КМТ-1 и ММТ-1 (рис. 11.7, з) предназначены для сухих помещений, имеют при температуре 20°C номинальные сопротивления соответственно 22...1000 и 1...220 кОм и работают при температуре до 120°C.

Их габаритные размеры невелики и составляют: диаметр 2 мм и длина 12 мм.

Терморезисторы КМТ-4 (рис. 11.7, д) отличаются от первых тем, что имеют плотный металлический чехол и могут работать во влажном воздухе. Их размеры — диаметр 4 мм, длина 30 мм.

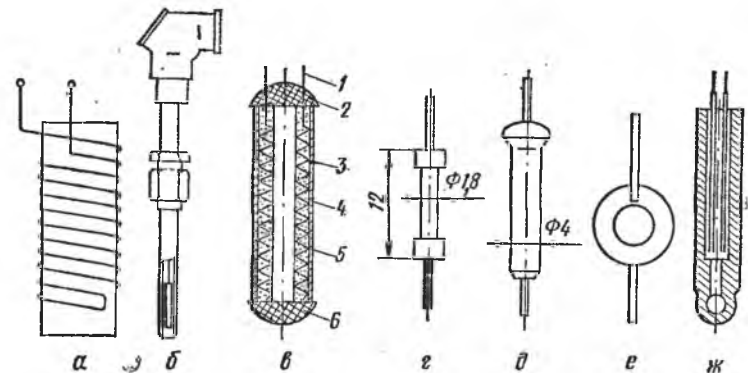


Рис. 11.7. Термометры сопротивления:
а, б — с медным терморезистором; в — с платиновым терморезистором; г, д, е — с полупроводниковыми терморезисторами, соответственно ММТ-1(КМТ-1), ММТ-4 (КМТ-4), ММТ-13; ж — с бусинковым микротермосопротивлением.

Терморезистор ММТ-13 (рис. 11.7, е) выполнен в виде шайбы диаметром 9,5 мм и может работать в сухом воздухе при температуре до 125°C.

Если требуется термосопротивление с малой тепловой инерцией, то применяют бусинковые термосопротивления типа МКМТ-16 (рис. 11.7, ж).

При изменении температуры изменяется сопротивление терморезистора, включенного в одно из плеч моста. На выходе моста устанавливают вторичный измерительный прибор.

Основные технические характеристики термометров сопротивления с металлическими терморезисторами приведены в таблице 11.3.

11.3. Техническая характеристика некоторых термометров сопротивления

Тип	Градуировка	Пределы измерений, °С	Длина монтажной части термометра, мм	Тепловая инерция, с	Измерение температуры
ТСП-6097	21	—50...150	80...500	9	Газов, жидкостей, не разрушающих защитную арматуру
	22	—50...250		30	
ТСМ-5071	23	—50...150	120...2000	20	Жидких и газообразных сред
	24	—50...150		40	
ТСП-5071	21	—200...600	120...2000	40	Жидких и газообразных сред
	22				
ТСП-175	21	—50...500	9000...3200	20	
	22				
ТСП-712	21	—50...400	60...630	15	Масла, воды, поверхности, твердых тел
ТСП-883	21	0...30	60	40	
ТСП-8012	22	—50...100	108×65×16	< 20 мин	Воздуха в кондиционируемых помещениях
ТСМ-8012	23	0...50	То же	240	
ТСМ-6114	23	—50...100	110	120	
ТСП-955М	22	0...200	100	9	

В качестве вторичных приборов в схемах измерения с термометрами сопротивления используют логометры, например типа Л-64, электронные мосты типа Ш69000, Ш69006, Ш69001 и автоматические приборы следящего уравнивания типов А542-601... А542-608; А543-401... А543-404; А502-301... А502-308.

Диапазон измеряемых температур термометрами сопротивления типа ТСП от —200 до +650 °С, а типа ТСМ от —50 до +180 °С.

11.8. Что такое реостатный преобразователь и как его можно использовать?

Реостатный преобразователь выполняется из изолированной проволоки 2, намотанной плотными рядами на изолированный каркас 3, и подвижного контакта 1, который скользит по неизолированному участку этой проволоки (рис. 11.8, а).

Форма каркаса может быть различной: линейной (рис. 11.8, б), цилиндрической (рис. 11.8, а) и даже профильной.

При перемещении подвижного контакта изменяются сопротивления плеч r_1 и r_2 . Это свойство преобразователя используется при измерении различных неэлектрических величин, например линейных и угловых перемещений, уровня жидкости в различных сосудах, давлений и т. п.

Самые простые схемы показаны на рисунке 11.8, *в*, *г*. Значения токов в схеме *в* и напряжения в схеме *г* зависят не только от положения движка, но и от напряжения источника питания. Поэтому, если требуется большая точность при измерении, то необходимо иметь стабилизированный источник питания либо в качестве измерителя использовать магнитоэлектрический логометр, у которого угол отклонения зависит только от отношения токов в рамках и не зависит от напряжения источника питания (рис. 11.8, *д*). В такой схеме каждому положению движка реостатного преобразователя соответствует определенный угол отклонения стрелки прибора,

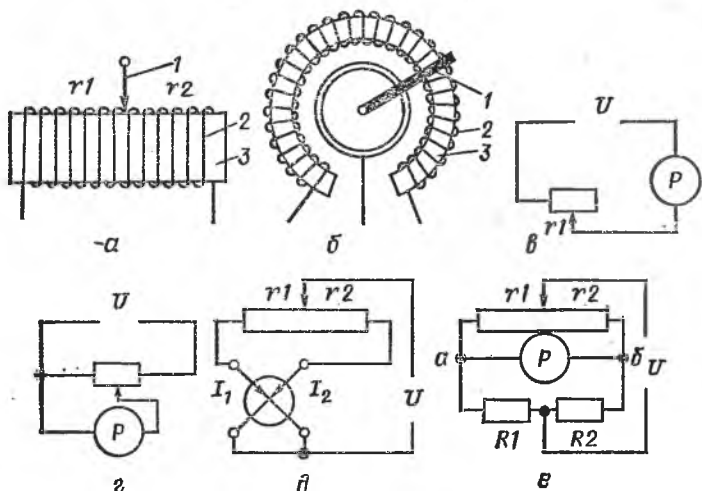


Рис. 11.8. Реостатный преобразователь:
а — цилиндрический; *б* — прямоугольный; *в*, *г*, *д*, *е* — схемы включения соответственно последовательная, параллельная, с логометром, мостовая.

поэтому шкалу прибора можно отградуировать в единицах измеряемой величины.

В более чувствительной к изменению сопротивлений плеч мостовой схеме перемещение движка реостатного преобразователя приводит к разбалансировке моста и к появлению напряжения небаланса в измерительной диагонали моста (рис. 11.8, *е*). Значение напряжения зависит от положения движка преобразователя, поэтому шкалу измерителя можно отградуировать в единицах измеряемой неэлектрической величины.

11.9. Как устроены проволочные преобразователи и где их можно применять!

Устройство проволочного преобразователя показано на рисунке 11.9, *а*. На тонкую папиросную бумагу *1* наклеивают уложенную зигзагообразно тонкую проволоку *2*. К концам проволоки припаивают или приваривают выводы *3* из медной фольги для подключе-

ния преобразователя в измерительную сеть. Иногда сверху проволоки тоже наклеивают тонкую бумагу.

В последнее время получают распространение проволоочные преобразователи (датчики), выполненные из тонкой константановой фольги различной конфигурации (рис. 11.9, б, в, г).

Проволоочные датчики наклеивают на испытываемую деталь так, что проволока воспринимает деформацию детали, в результате чего изменяется сопротивление проволоки. При растяжении сопротивление датчика увеличивается, а при сжатии уменьшается. Относительное изменение сопротивления датчика прямо пропорционально изменению деформации датчика или относительному удлинению детали:

$$\Delta r/r = s \Delta l/l = s\varepsilon,$$

где Δr — приращение сопротивления проволоки датчика под действием деформации; r — номинальное сопротивление преобразо-

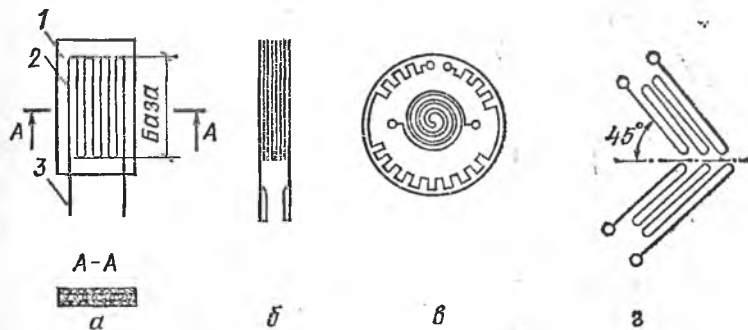


Рис. 11.9. Проволоочные преобразователи:

а — общий вид; б — для измерения линейных деформаций; в — для измерения давлений; г — для измерения крутящих моментов.

вателя; s — относительная чувствительность преобразователя, зависящая от материала проволоки; ε — относительная деформация детали.

Поскольку относительное изменение сопротивления в этих датчиках невелико, то для улавливания таких малых изменений сопротивлений используют чувствительные мостовые схемы, а выходной сигнал моста в его измерительной диагонали, как правило, усиливается при помощи специальных тензоусилителей. Это вызывает дополнительные ошибки в результатах измерений.

Проволоочными датчиками можно пользоваться лишь тогда, когда выполнена их предварительная градуировка, то есть установлена зависимость угла отклонения измерителя от деформации при помощи специальных балок равного сопротивления, что безусловно затрудняет применение удобных, малогабаритных, практически безынерционных тензодатчиков.

С целью уменьшения погрешности измерений градуируют датчики с применением того тензоусилителя, того измерителя и тех соединительных проводов, которые будут в дальнейшем использо-

ваться при определении деформации в исследуемой детали. Правда, датчики в этом случае берут той же базы, такого же сопротивления, что и датчики, используемые при тарировке.

Датчики наклеивают на исследуемую деталь клеем БФ-2. Можно самим изготовить ацетоно-целлулоидный клей, представляющий собой раствор чистого целлулоида в ацетоне: 6...8 г целлулоида и 100 см³ ацетона. Такой клей схватывается за несколько минут при комнатной температуре, но окончательно высыхает в течение суток, поэтому датчики нужно наклеивать на деталь заранее, хотя бы за сутки.

Промышленность выпускает датчики типа ПБ на бумажной основе и типа ПП на пленочной. Значение базы и сопротивления датчиков ПБ при базе 5 мм составляет 50 и 100 Ом; при 10 мм — 50, 100, 200 Ом; при 15 мм — 50, 100, 200, 300 Ом; при 20, 25 и 30 мм — 100, 200, 300 и 400 Ом.

11.10. Как устроены и работают индуктивные преобразователи?

Простейшим индуктивным преобразователем может служить катушка 1 с подвижным ферромагнитным сердечником 2 (рис. 11.10, а). Если в катушку вводить сердечник, то увеличится ее индуктивность.

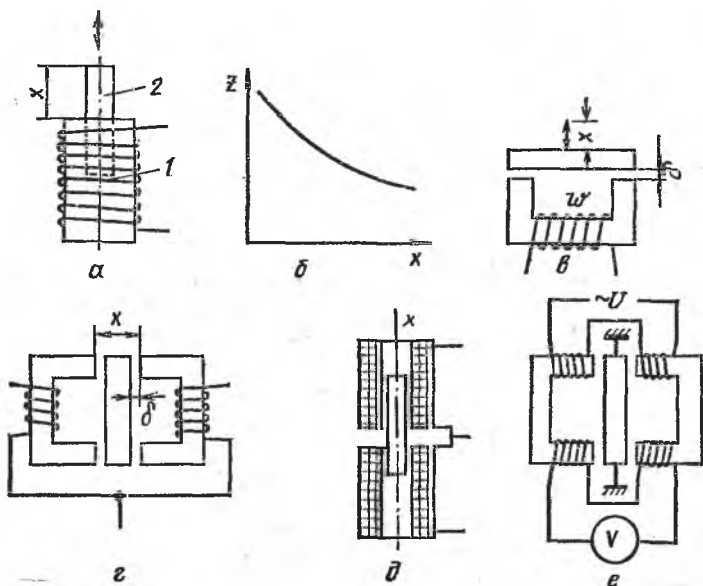


Рис. 11.10. Индуктивные преобразователи:

а, б — с разомкнутым магнитопроводом; в — с замкнутым магнитопроводом; г, д — дифференциальные соответственно с малым и большим линейным перемещением; е — трансформаторный.

При введении в катушку ферромагнитного сердечника увеличивается магнитная проницаемость, изменяется магнитное сопротивление, а значит и полное сопротивление катушки. Однако в таких преобразователях зависимость полного сопротивления Z от положения сердечника x нелинейна (рис. 11.10, б), что затрудняет градуировку таких датчиков. Достоинство таких датчиков — большое перемещение сердечника, достигающее 100 мм, и простота устройства.

Просты по устройству и индукционные датчики с замкнутым магнитопроводом (рис. 11.10, в), имеющим очень малый воздушный переменный зазор δ . При перемещении подвижной части магнитопровода изменяется воздушный зазор δ , вследствие чего изменяется индуктивность катушки, а следовательно, и ее полное сопротивление. Однако зависимость $Z=f(x)$ нелинейна.

С целью получения линейной зависимости $Z=f(x)$ изготавливают различные так называемые дифференциальные индуктивные преобразователи. На рисунке 11.10, г, д, е показана конструкция некоторых из них. При изменении положения ферромагнитного сердечника происходит изменение полных сопротивлений, как правило, двух катушек, причем индуктивное сопротивление у одной из них увеличивается, а у другой уменьшается. Уловить эти изменения сопротивлений катушек и должен индуктивный преобразователь, например при помощи мостовой измерительной схемы.

11.11. В чем особенность емкостных преобразователей!

Известно, что значение емкости плоского конденсатора прямо пропорционально площади пластин, из которых изготовлен конденсатор, зависит от свойств среды, находящейся между пластинками, и обратно пропорционально расстоянию между ними.

Существуют различные конструкции емкостных преобразователей. На рисунке 11.11, а показана одна из возможных конструкций емкостного датчика, у которого переменной величиной является расстояние между пластинками d . Если при помощи какой-то неэлектрической величины, например механической силы, изменить расстояние между пластинками, то емкость такого датчика будет пропорционально изменяться, расти при сближении пластин и уменьшаться при их удалении. Задача сводится к тому, чтобы уловить это изменение емкости, например путем включения ее в плечо мостовой схемы, питающейся от источника переменного тока.

На рисунке 11.11, б показано устройство емкостного преобразователя, у которого одна из пластин подвижна. Следовательно, изменяя ее положение при помощи какой-то неэлектрической величины x , можно по значению емкости судить об измеряемой величине.

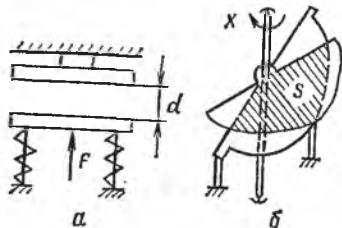


Рис. 11.11. Емкостные преобразователи:

а — с изменением расстояния между электродами; б — с изменением площади взаимодействия электродов.

Так измеряют различные угловые перемещения, крутящие моменты и т. д.

Часто применяют емкостные датчики для измерения параметров сред с различными значениями диэлектрической постоянной ϵ .

Значение внутреннего сопротивления емкостного датчика можно определить по формуле

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Здесь f — частота тока; C — значение емкости плоского конденсатора,

$$C = S \epsilon / d,$$

где S — площадь пластин; d — расстояние между пластинами.

Емкостные датчики просты по устройству, удобны в работе, имеют малую инерционность, однако их выходная мощность очень мала, поэтому требуются специальные усилительные устройства, необходимы экранизация соединительных проводов и применение высокочувствительных приборов.

Для повышения точности и чувствительности емкостный преобразователь делают обычно дифференциальным и его емкости включают в соседние плечи измерительного моста. В этом случае уменьшение или увеличение зазора между пластинами вызывает пропорциональное уменьшение или увеличение напряжения между соответствующими пластинами, а равнодействующая сил, действующих на пластины, остается неизменной.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Глава 12. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА

12.1. Какие методы измерения силы электрического тока применяют на практике?

Для измерения постоянных и переменных токов используют как прямые, так и косвенные методы.

Выбор методов и средств измерения силы электрического тока зависит от частоты тока, амплитуды, формы кривой тока, мощности измерительной цепи, мощности, потребляемой средством измерения, необходимой точностью измерения. Если электромеханические приборы обеспечивают заданную точность измерения, следует их предпочесть другим средствам измерения, как более простые и дешевые.

Многие сельскохозяйственные потребители постоянного тока имеют силу тока в пределах от 0,5 до 10 А. Токи от 0,5 до 6 кА проще всего измерять амперметром магнитоэлектрической и электродинамической систем.

Для определения малых постоянных токов в маломощных цепях используют зеркальные гальванометры и магнитоэлектрические микроамперметры.

Наиболее высокую точность измерения постоянных токов получают при измерении компенсационным методом при помощи потенциометров или при измерении цифровыми амперметрами (погрешность не более 0,02 %). Этим методом можно измерить токи начиная от 10^{-8} А.

Для расширения пределов измерений в цепях постоянного тока используют шунты, но применение шунтов приводит к увеличению мощности, потребляемой средствами измерений, снижению их точности и чувствительности.

Приборы для измерения тока, выпускаемые промышленностью, градуируют обычно в действующих значениях тока, хотя некоторые типы измерительных механизмов, например выпрямительные, электронные, цифровые, реагируют на средневыпрямленное или даже на амплитудное значение тока. В этом случае при измерении несинусоидальных токов возникает дополнительная погрешность.

Для измерения переменных токов до 10 мкА применяют электронные микроамперметры (класс точности 1,5 . . . 2,5), токов свыше 10 мкА — цифровые амперметры (погрешность не более 0,5 %), токов свыше 100 мкА — миллиамперметры выпрямительной системы и термоэлектрической системы с промежуточными усилителями постоянного тока (класс точности 1,0 . . . 1,5), токов свыше 1 мА — ферродинамические миллиамперметры (класс точности 0,5).

Для измерения средних значений силы тока промышленной частоты применяют приборы электромагнитной, электродинамической, ферродинамической, выпрямительной, термоэлектрической, электронной систем, цифровые амперметры, компенсаторы пере-

мелного тока. Наибольшую точность измерений обеспечивают электродинамические приборы, а наиболее широко применяются электромагнитные приборы.

Если высокая точность измерений синусоидальных токов не требуется, удобно пользоваться переносными многопредельными вольтамперметрами выпрямительной системы (погрешность 1,5...3 %).

Для измерений больших токов промышленной частоты используют те же приборы, но включают их через измерительные трансформаторы тока.

Если необходимо записать во времени изменение тока, то для этого обычно используют самопишущие приборы ферродинамической системы.

Токи повышенной и высокой частоты измеряют амперметрами электростатической, термоэлектрической систем, выпрямительными, электронными и цифровыми приборами. Применение того или иного прибора зависит от частоты измеряемого тока, входного сопротивления или индуктивности прибора, так как включение измерительного прибора в сеть может изменить режим работы цепи, ее эквивалентное сопротивление и самую измеряемую величину.

Наиболее точные измерения (погрешность до 1 %) обеспечиваются цифровыми вольтметрами переменного тока и цифровыми комбинированными приборами.

12.2. Как измерить силу постоянного тока компенсационным методом?

Наиболее высокую точность измерения силы постоянного тока можно получить при помощи потенциометра (компенсатора) постоянного тока (рис. 9.1). Для того чтобы при помощи потенциометра измерить силу тока I_x , необходимо на его зажимах U_x получить напряжение, пропорциональное этому току, используя вспомогательную цепь, в которой последовательно с нагрузкой R_H включен образцовый резистор $R'_0 \ll R_H$. Тогда измерение силы тока I_x сведется к измерению падения напряжения на R'_0 , равного $U_x = I_x R'_0$ (см. п. 9.1). Значение U_x определяют по положению ручек потенциометра. Следовательно, $I_x = U_x / R'_0$.

12.3. Как правильно выбрать гальванометр для измерения малых постоянных токов?

При выборе гальванометра необходимо учитывать его внешнее критическое сопротивление, чувствительность по току (или напряжению) или обратную ей величину, так называемую постоянную гальванометра по току (или по напряжению), которую приводят в паспорте гальванометра или определяют опытным путем, и период свободных колебаний подвижной системы прибора.

Если в цепи гальванометра при его включении большое внешнее сопротивление $R_{вн}$ (рис. 12.1, а), то стрелка гальванометра (или «зайчик» на его шкале) будет длительно колебаться около какого-то установившегося положения. Работать с таким гальванометром очень неудобно (см. рис. 12.1, б, кривая 1). Если отключить галь-

ванометр с таким большим внешним сопротивлением, то можно наблюдать длительное колебание стрелки около нулевого положения, прежде чем она остановится. Такой режим работы гальванометра называют колебательным, он нежелателен (кривая 1 на рис. 12.1, б).

Если при включении гальванометра сопротивление $R_{вн}$ незначительно или равно нулю, то при его включении стрелка прибора медленно приближается к установившемуся значению (рис. 12.1, б, кривая 3), а при отключении гальванометра с малым внешним сопротивлением стрелка прибора очень медленно приближается к нулевой отметке (рис. 12.1, в, кривая 3). Этот режим работы гальванометра называется аperiodическим, он тоже неудобен для работы.

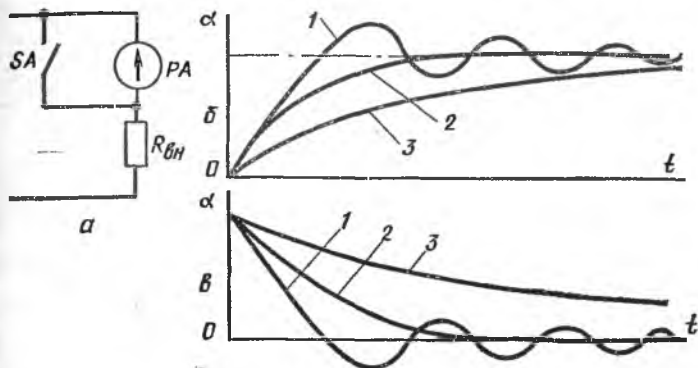


Рис. 12.1. Схема включения магнитоэлектрического гальванометра с подвижной рамкой с внешним сопротивлением (а) и графики движения рамки гальванометра при его включении (б) и выключении (в) в зависимости от сопротивления внешней сети.

Самый благоприятный режим работы гальванометра называется критическим. Он характерен тем, что при включении гальванометра стрелка его приближается к установившемуся значению без колебаний за самое короткое время (рис. 12.1, б, кривая 2). Внешнее сопротивление, при котором наступает критический режим, называется внешним критическим сопротивлением. Значение внешнего критического сопротивления $R_{вн.кр}$ обычно указано на шкале или в паспорте гальванометра.

При отключении гальванометра с внешним сопротивлением, равным $R_{вн.кр}$, стрелка приближается к нулевой отметке без колебаний за самое короткое время (рис. 12.1, в, кривая 2).

Если $R_{вн.кр}$ неизвестно, то его можно определить опытным путем, собрав схему, показанную на рисунке 12.2. К источнику питания GB подключают два регулируемых резистора $R1, R2$. К их движкам подключают образцовый резистор R_0 . Падение напряжения в резисторе R_0 определяют гальванометром PA , включенным через сопротивление $R_{вн}$. Включая ключи $SA1$ и $SA2$, следят за режимом работы гальванометра при различных значениях сопротивления $R_{вн}$ и определяют критический режим.

Параллельно гальванометру подключается ключ SB с целью быстрого усюкоения стрелки прибора. Например, если отключить гальванометр ключом $SA2$, что соответствует разрыву цепи гальванометра или включению в цепь рамки гальванометра бесконечно большого сопротивления, то при движении рамки в магнитном поле в ней будет наводиться ЭДС. Тока в рамке не будет, поэтому не воз-

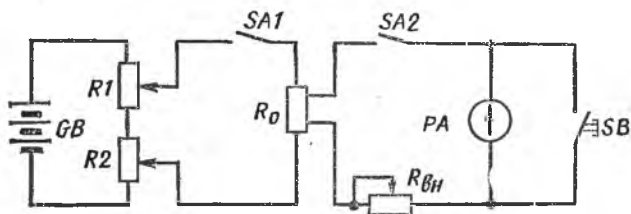


Рис. 12.2. Схема для определения внешнего критического сопротивления гальванометра.

никнет успокаивающий момент и рамка будет долго колебаться. Чтобы быстро остановить стрелку, нужно нажать кнопку SB , когда стрелка проходит через нулевую отметку.

12.4. Как правильно рассчитать сопротивление шунта!

Требуемое сопротивление шунта (см. п. 10.3) можно определить из выражения $R_{ш} = R_A / (p - 1)$.

Измеряемый ток определяют путем умножения показаний амперметра на коэффициент шунтирования p : $I_x = I_A p$.

Для удобства перемножения значение коэффициента шунтирования при малых пределах расширения выбирают равным целому числу, а при больших — кратным десяти.

Например, имеется амперметр с током полного отклонения 2 А, необходимо им измерять ток, значение которого примерно 14 А. На первый взгляд удобно коэффициент шунтирования принять равным 7 ($p = 14/2$), сопротивление шунта будет в этом случае меньше внутреннего сопротивления амперметра в 6 раз. Но тогда при определении численного значения измеряемого тока показание амперметра следовало бы всякий раз умножать на 7, что не совсем удобно. Поэтому коэффициент шунтирования лучше взять равным 10, а сопротивление шунта в 9 раз меньше внутреннего сопротивления амперметра. В последнем случае верхний предел измерений амперметра будет уже 20 А, а измеряемому току 14 А будет соответствовать показание на шкале прибора 1,4 А.

В том случае, если необходим многопредельный амперметр, например на два предела (рис. 12.3) I_1 и I_2 ($I_1 < I_2$), поступают следующим образом. Вычисляют коэффициенты деления токов (коэффициенты шунтирования) $p_1 = I_1 / I_A$; $p_2 = I_2 / I_A$. На пределе измерений тока I_1

$$R_1 + R_2 = R_A / (p_1 - 1). \quad (12.1)$$

На пределе измерений тока I_2 шунтом служит резистор R_2 , тогда

$$R_2 = (R_1 + R_A) (p_2 - 1). \quad (12.2)$$

Решив систему двух уравнений (12.1) и (12.2), получают

$$R_1 = [R_A p_1 / (p_1 - 1)] (1/p_1 - 1/p_2);$$

$$R_2 = R_A p_1 / (p_1 - 1) p_2.$$

При выборе шунта следует также учитывать, что класс точности его должен соответствовать классу точности прибора.

Шунт всегда включают последовательно в цепь измеряемого тока, амперметр присоединяют параллельно шунту. Включать амперметр в цепь измеряемого тока и параллельно подключать к нему шунт не допускается, так как в случае неисправности шунта через обмотку амперметра пойдет чрезмерно большой ток, что приведет к ее перегоранию.

Обычно все стандартные шунты калиброваны и рассчитаны на получение на потенциальных зажимах шунта при протекании номинального тока следующих напряжений: 45; 75; 100; 150 мВ. По точности их делят на пять классов: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5.

Сопротивление шунтов весьма мало (сотые и тысячные доли ома) и соизмеримо с сопротивлением контактов. Чтобы исключить влияние сопротивления контактов, шунты имеют две пары зажимов: токовые, к которым подключают цепь измеряемого тока, и потенциальные, к которым подключают амперметр, они снабжены калиброванными проводами.

На однопредельных шунтах обычно указывают номинальный ток, на который рассчитан шунт, и значение падения напряжения на его потенциальных зажимах при протекании через шунт номинального тока.

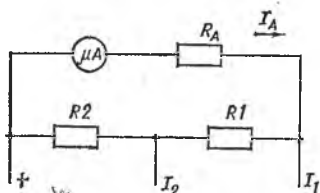


Рис. 12.3. Схема включения амперметра с многопредельным шунтом.

12.5. Как правильно выбрать трансформатор тока для расширения пределов измерений приборов в цепях переменного тока?

При измерении силы переменного тока амперметром следует показания снимать в конце шкалы прибора. Если значение измеряемого тока меньше верхнего предела измерений, указанного на приборе, то последний включают непосредственно в сеть последовательно с нагрузкой. Если измеряемый ток больше верхнего предела измерений, указанного на приборе, то для расширения пределов измерений обычно применяют измерительный трансформатор тока (рис. 12.4, а).

Зная номинальный коэффициент трансформации k_{HI} и показания амперметра I_2 , можно определить силу измеряемого тока

$$I_1 = I_2 k_{HI}.$$

При измерении больших токов первичную обмотку трансформатора тока включают последовательно в цепь измеряемого тока, а во вторичную обмотку включают амперметр (рис. 12.4, а) с малым сопротивлением (не более 2 Ом). Предельное значение сопротивле-

ния, на которое может быть замкнута вторичная обмотка, приводится в паспорте трансформатора. Амперметр обычно рассчитан на ток 5 А. Вторичную обмотку трансформатора тока заземляют.

Измерительный трансформатор тока выбирают в зависимости от условий работы и значения измеряемого тока. Например, если требуется измерить ток порядка 80 А, то необходимо взять трансформатор тока, рассчитанный на номинальный первичный ток 100 А, то есть с $k_{HI} = 100/5 = 20$. Допустим, показания амперметра равны 3,8 А, тогда действующее значение измеряемого тока

$$I_I = 3,8 \cdot 20 = 76 \text{ А.}$$

Переносные трансформаторы тока выполняют обычно многопредельными. Их первичная обмотка либо имеет несколько секций, включенных последовательно, параллельно или смешанно (чем изменяют предел измерений), либо от нее делают отводы.

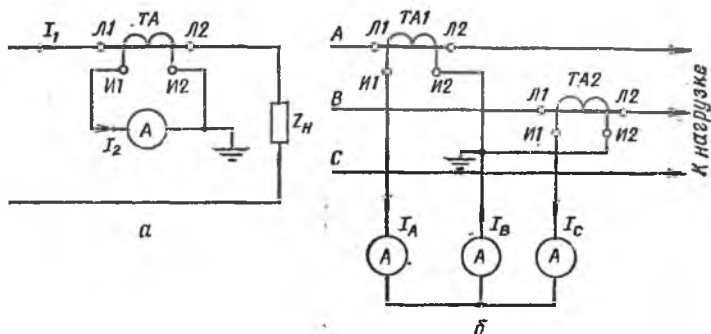


Рис. 12.4. Схемы включения амперметров при помощи измерительных трансформаторов тока:

а — в однофазной сети; б — в трехфазной сети.

Для дополнительного расширения пределов измерений в корпусах переносных трансформаторов тока имеется окно, через которое можно намотать нужное число витков проводом, подключающим измерительную цепь, создавая тем самым витки первичной обмотки. Число витков и площадь сечения кабеля первичной обмотки зависят от значения измеряемого тока, их определяют по таблице, размещенной на лицевой стороне трансформатора тока. Необходимо следить за тем, чтобы общее сопротивление подключаемых ко вторичной обмотке проводов не превышало значения, указанного в табличке на трансформаторе тока.

При работе с измерительными трансформаторами тока необходимо следить за тем, чтобы вторичная обмотка при подключенной первичной не оставалась разомкнутой (см. п. 10.5).

Если нагрузка изменяется в узких пределах, то можно брать определенный измерительный трансформатор тока, например типа ТК в низковольтной и типа ТПОЛ-10 в высоковольтной сети.

Если измеряемые токи не превышают 50 А, то удобно пользоваться универсальными трансформаторами тока типа И54, имеющими семь первичных номинальных токов: 0,5; 1,0; 2; 5; 10; 20;

50 А и вторичный номинальный ток 5 А. Как видно, измерительный трансформатор тока может не только уменьшать ток, но и увеличивать его. Например, при номинальном токе 0,5 А измерительный трансформатор тока увеличивает первичный ток в 10 раз.

Если в низковольтной сети измеряемые токи достигают 600 А, то в этом случае удобны универсальные измерительные трансформаторы тока типа УТТ, которые имеют собственную первичную обмотку, рассчитанную на ток 15 и 50 А, и могут иметь наружную обмотку, наматываемую на сердечник при больших токах. Число витков выбирают по таблице, укрепленной на трансформаторе. Изменяя число витков катушки, можно устанавливать различные номинальные токи.

Очень удобны измерительные клещи, отличающиеся от измерительных трансформаторов тока наличием разъемного магнитопровода, что позволяет измерять ток в проводах без их предварительного разрыва. Измерительные клещи включают в цепь только во время измерения. Основной их недостаток — меньшая точность.

12.6. Как измерить силу тока повышенной и высокой частоты потенциометром переменного тока?

Силу тока повышенной частоты удобно измерять потенциометрами (компенсаторами) переменного тока, но этот способ обеспечивает меньшую точность измерений, чем в схемах постоянного тока. В схеме измерения тока полярно-координатным потенциометром (рис. 12.5) измеряемый ток I_x пропускают через образцовый резистор R_0 и падение напряжения на нем $U_x = I_x R_0$ подается на вход компенсатора, последовательно с которым включен вибрационный гальванометр $PA1$.

Подбором положений движков $D1$ и $D2$ резисторов $R1$ и $R2$ добиваются равенства $|U_k| = |U_x|$ по модулю, а при помощи фазорегулятора ΦP — равенства фазовых сдвигов $\varphi_x = -\varphi_k$. Выполнение обоих условий определяют по отсутствию отклонений показаний вибрационного гальванометра, тогда по измеренному падению напряжения определяют измеряемый ток

$$I_x = U_k / R_0.$$

Для обеспечения максимальной точности образцовый резистор следует выбирать таким, чтобы падение напряжения на нем от измеряемого тока было ближе к номинальному пределу измерения компенсатора, то есть $U_x \approx U_k$.

Выбранный образцовый резистор должен также проходить по допустимой нагрузке

$$R_0 I_x^2 \leq P_n.$$

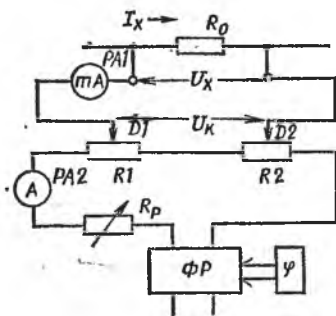


Рис. 12.5. Схема измерения силы тока повышенной и высокой частоты потенциометром переменного тока.

12.7. В чем особенность измерения силы переменного тока в трехфазных сетях?

Силу тока в трехфазной сети можно измерить либо одним амперметром (при симметричной нагрузке), либо тремя амперметрами, включенными в каждую фазу приемника.

В высоковольтной трехфазной трехпроводной сети все три линейных тока можно измерить при помощи двух трансформаторов тока (рис. 12.4, б). Это возможно потому, что в трехпроводной цепи сумма токов равна нулю: $\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0$. Следовательно, зная два тока, можно определить и третий.

Первый амперметр включают во вторичную обмотку первого трансформатора тока, третий амперметр — во вторичную цепь второго трансформатора тока, а второй амперметр включают на сумму токов $\bar{I}_A + \bar{I}_C$, следовательно, его показания будут пропорциональны току I_B .

Глава 13. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ

13.1. Какие методы измерения напряжения применяют на практике?

Напряжение можно измерять прямым методом, с помощью вольтметров различных систем, а также компенсационными методами. Если электромеханические вольтметры обеспечивают заданную

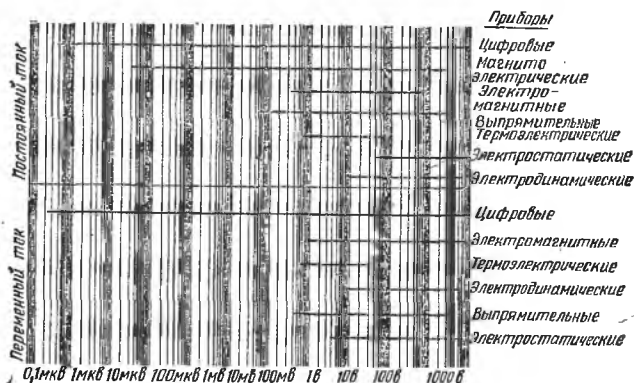


Рис. 13.1. Диапазоны измерений напряжения вольтметрами различных электроизмерительных систем.

точность измерения, то для измерения напряжения лучше всего использовать их как более простые и дешевые.

Для измерения постоянного напряжения можно использовать магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, ферродинамические, электростатические вольтметры, а также более сложные электронные и цифровые. Возможный диапазон применения вольтметров того или иного типа показан на рисунке 13.1,

Для измерения напряжения постоянного тока наиболее широко используют магнитоэлектрические приборы.

Если необходимо измерять малые постоянные напряжения с высокой точностью, то применяют потенциометры постоянного тока, цифровые вольтметры или цифровые комбинированные приборы, например, Щ1611, Щ1313, Щ1513, Щ300, В7-22, В7-23 и т. п.

Для расширения диапазона измерений прибора используют добавочные резисторы, включаемые последовательно с прибором. Добавочные резисторы следует подбирать так, чтобы измерение проводилось в конце шкалы прибора.

При выборе вольтметра для измерения напряжения следует учитывать его такую важную характеристику, как входное сопротивление

$$R_{вх} = U_x / I,$$

где U_x — измеряемое напряжение; I — общий ток, проходящий через добавочный резистор и вольтметр (индикатор).

Чем больше входное сопротивление вольтметра, тем меньше он влияет на объект измерения (тем меньшую мощность от объекта измерения он потребляет).

Чем больше чувствительность прибора, или его разрешающая способность, тем больше должно быть его входное сопротивление.

Для измерения действующих значений напряжений переменного тока промышленной частоты обычно применяют вольтметры электромагнитной (если не требуется большой точности измерений), электродинамической (если требуется большая точность измерений) и электростатической (если нужен вольтметр с большим внутренним сопротивлением) систем.

Все эти приборы, как и вольтметры постоянного тока, имеют измерительный механизм с последовательно включенным добавочным резистором.

Если требуется большая точность измерения напряжения, то используют потенциометры переменного тока (см. п. 9.2), цифровые и электронные вольтметры.

Вольтметры (милливольтметры, киловольтметры) включают параллельно участку цепи, падение напряжения на котором необходимо измерить, если верхний предел измерений прибора больше измеряемого напряжения. Если измеряемое напряжение больше верхнего предела измерений, указанного на приборе, то для расширения пределов измерений прибор включают через измерительный трансформатор напряжения (п. 10.2) по схеме на рисунке 13.2, а.

Вольтметры для измерения напряжений на повышенной и высокой частоте обычно имеют магнитоэлектрический измерительный механизм в сочетании с полупроводниковыми или ламповыми преобразователями переменного тока в постоянный.

Предпочтение часто отдают вольтметрам с полупроводниковыми выпрямителями из-за их простоты, компактности, отсутствия необходимости внешних источников питания, большого входного сопротивления, высокой надежности.

Полупроводниковые выпрямители, однако, не позволяют измерить напряжение с высокой точностью. Для измерения малых напряжений лучше применять прибор, выполненный по схеме, приведенной на рисунке 6.3, а.

Для измерения больших напряжений удобнее схема, что на рисунке 6.3, б.

Прибором обычно измеряют действующее значение напряжений синусоидального тока. При несинусоидальном токе появляется дополнительная погрешность прибора. Выпрямительным приборам свойственна также частотная погрешность.

При измерении напряжений повышенной частоты при помощи потенциометров переменного тока (см. п. 9.2) пользуются также схемой измерения по рисунку 9.2, а. Однако в этом случае ЭДС во вторичной обмотке воздушного трансформатора увеличивается. $E = 4,44 f \omega_2 \Phi_M$, следовательно, увеличивается и рабочий ток I_{p2} . Чтобы сохранить его постоянным, то есть уменьшить частотную сос-

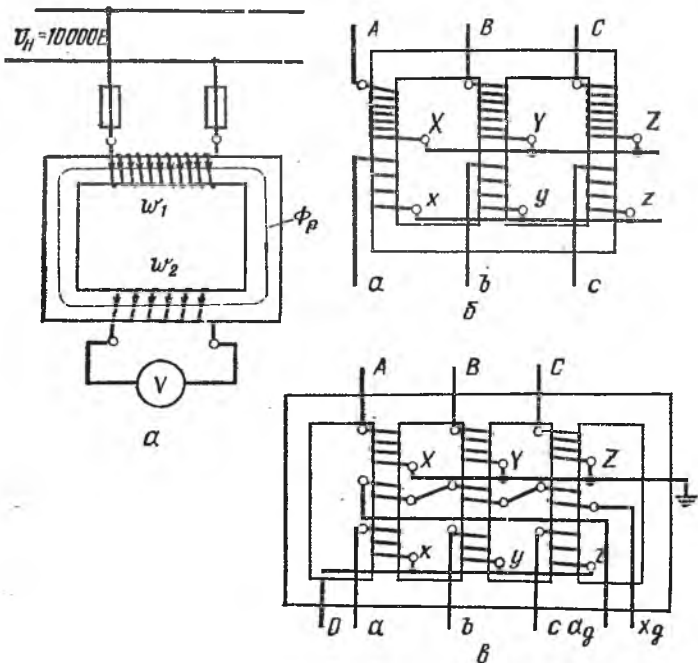


Рис. 13.2. Измерительный трансформатор напряжения:
 а — однофазный; б — трехфазный; в — трехфазный пятистержневой.

ставляющую дополнительной погрешности, введен добавочный резистор R_f . В остальном методика измерения напряжения остается той же.

Для измерения напряжений повышенной и высокой частоты широко применяют термоэлектрические, электронные и цифровые вольтметры. Частотный диапазон применения того или иного типа прибора показан на рисунке 13.3.

Пределы измерений прибора для измерений напряжений повышенной и высокой частоты расширяют при помощи добавочных резисторов и делителей напряжения. Многопредельные приборы имеют несколько добавочных резисторов или многопредельный резисторный делитель напряжения.

43.2. Как правильно подобрать добавочный резистор для расширения предела измерений вольтметра постоянного тока!

Значение сопротивления необходимого добавочного резистора, включенного последовательно с вольтметром (милливольтметром) для расширения пределов измерений (п. 13.1), определяют по формуле

$$R_d = R_V (q - 1), \quad (13.1)$$

где R_V — внутреннее сопротивление вольтметра; q — коэффициент, показывающий, во сколько раз нужно расширить пределы измерений прибором.

Значение коэффициента q определяют по формуле

$$q = U_1 / U_V,$$

где U_1 — новый предел измерений напряжения; U_V — предел напряжения вольтметра, указанный на приборе.

Например, если вольтметром с $U_V = 100$ В и внутренним сопротивлением R_V требуется измерить постоянное напряжение порядка

Приборы



Рис. 13.3. Частотный диапазон применения вольтметров различных систем для измерения переменного напряжения.

180 В, то в этом случае можно взять $q = 1,8$, тогда численное значение сопротивления, определенное по формуле (13.1), должно быть $R_d = R_V (q - 1) = 0,8 R_V$. Но если установить такой добавочный резистор, то надо показания вольтметра всякий раз умножать на $q = 1,8$, что неудобно. Поэтому в данном случае лучше принять новый предел измерений $U_1 = 200$ В, тогда $q = 2$. Следовательно, для расширения предела измерений вдвое надо выбрать добавочный резистор с сопротивлением, равным $R_d = R_V (2 - 1) = R_V$, тогда для определения значения измеряемого напряжения следует показание прибора увеличить вдвое.

В многопредельных вольтметрах q выбирают обычно равным 10 и получают пределы измерений, тоже кратные 10. В частности, в вольтметре М1106 имеем пределы, кратные десяти 1,5; 15; 150; 7,5; 75; 750 и 3; 30; 300 В. Ясно, что в каждом конкретном случае следует определять цену деления шкалы прибора путем деления

предела измерений на число делений шкалы. Часто для получения удобной цены деления делают не одну шкалу, а две с разным числом делений.

Промышленность выпускает комбинированные добавочные резисторы, которые часто поставляют вместе с измерительными приборами.

Иногда вместе с прибором поставляется целый комплект добавочных резисторов, таких как К12 класса точности 0,1 для расширения пределов измерений магнитоэлектрических вольтметров с пределом измерений 3 В и током полного отклонения 3 мА. Так, добавочный резистор Р82/2 позволяет измерять следующие напряжения: 7,5; 15; 30; 75; 150; 300; 600 В, а Р82/3 — соответственно 750; 1500 В и т. п.

13.3. Как измерить постоянное напряжение при помощи потенциометра постоянного тока!

Компенсационный метод измерения при помощи потенциометра состоит в сравнении измеряемого неизвестного напряжения с известным падением напряжения на образцовом резисторе (рис. 9.1). В момент компенсации схема не потребляет мощности от источника напряжения (или ЭДС).

При измерении напряжения U_x переключатель SA ставят в положение 1 и при помощи регулировочного реостата R_p изменяют рабочий ток I_p до тех пор, пока ток в гальванометре PA не уменьшится до нуля. Это означает, что потенциал точки A стал равен потенциалу точки C , а потенциал точки B стал равен потенциалу точки D , только при этом условии тока в цепи гальванометра не будет. Падение напряжения в образцовом резисторе R_0 стало равно ЭДС нормального элемента $I_p R_0 = E_N$, следовательно, рабочий ток стал равен $I_p = E_N / R_0$. Обычно числовое значение рабочего тока небольшое и составляет порядка $1 \cdot 10^{-4}$ А. В дальнейшем рабочий ток останется постоянным. Потенциометр готов для измерения напряжения U_x .

Измеряемое напряжение U_x подают на клеммы E_x , переключатель SA ставят в положение 2. Как правило, в этот момент через гальванометр проходит ток. Это значит, что падение напряжения, вызванное рабочим током в компенсационном резисторе, оказалось больше или меньше измеряемого напряжения. При помощи движка D начинают изменять значение сопротивления компенсационного резистора r_k , изменяя таким образом сравниваемое падение напряжения $I_p r_k$ с измеряемым напряжением U_x . Движок D перемещают до тех пор, пока ток, проходящий через гальванометр, не станет равным нулю. В момент полной компенсации (когда ток гальванометра равен нулю) $E_x = I_p r_k = U_x$. Подставляя значение I_p в эту формулу, получают измеряемое напряжение

$$U_x = E_N r_k / R_0.$$

В формулу входят две очень точные величины E_N и R_0 . Следовательно, точность измерения напряжения зависит от точности выполнения компенсационного резистора и от возможности плавного его изменения.

В промышленных потенциометрах компенсационные резисторы

выполняют по схеме с шунтирующими декадами, по схеме с двойными декадами или по схеме Уманцева.

Компенсационный резистор с шунтирующими декадами выполнен из десяти резисторов по 1000 Ом каждое. При прохождении через них рабочего тока $I_p = 1 \cdot 10^{-4}$ А в каждом резисторе падение напряжения $\Delta U_1 = 0,1$ В (рис. 13.4, а). Параллельно одной из декад можно включать еще декаду — набор девяти резисторов по 1000 Ом каждый, следовательно, в эту декаду будет ответвляться одна десятая часть рабочего тока — $0,1 I_p$, поэтому в каждом резисторе второй декады будет падение напряжения, равное $\Delta U_2 = 0,01$ В.

В третью шунтирующую декаду ответвляется уже 0,01 часть рабочего тока. Падение напряжения в каждом резисторе будет равно $\Delta U_3 = 0,001$ В.

Работают с таким компенсационным резистором следующим образом. При подключении измеряемого напряжения через гальванометр проходит ток. Движок $D1$ передвигают до тех пор, пока ток в гальванометре не получит минимального значения. После этого начинают перемещать движок $D2$ до минимального отклонения стрелки гальванометра. Затем для движка $D3$ находят такое положение, при котором ток в гальванометре равен нулю.

Если на рисунке показано положение, когда ток гальванометра равен нулю, то можно утверждать, что измеряемое напряжение скомпенсировано падением напряжения в четырех резисторах первой декады, в трех резисторах второй декады и в пяти резисторах третьей декады, то есть

$$U_x = 4 \Delta U_1 + 3 \Delta U_2 + 5 \Delta U_3 = 0,435 \text{ В.}$$

Таким образом, при помощи компенсационного резистора можно измерить напряжение с точностью до 0,001 В.

Компенсационный резистор с двойной декадой собирают из двух декад с резисторами по 1000 Ом каждый, из двух декад с резисторами по 100 Ом каждый и т. д. (рис. 13.4, б).

При прохождении рабочего тока в каждом резисторе первой пары декад падение напряжения равно $\Delta U_1 = I_p R = 0,1$ В, в каждом резисторе второй пары декад падение напряжения равно $\Delta U_2 = 0,01$ В и т. д. Таким образом, если при измерении движки $D1$, $D2$ и $D3$ оказались в момент полной компенсации в положении, указанном на рисунке 13.4, б, то измеренное напряжение равно

$$U_x = 5 \Delta U_1 + 5 \Delta U_2 + 7 \Delta U_3 = 0,557 \text{ В.}$$

Компенсационный резистор по схеме Уманцева выполнен всего из одной декады резисторов по 1000 Ом (рис. 13.4, в).

При помощи специального делителя тока и движка $D1$ можно через резистор пропускать рабочий ток и получать падения напряжений $\Delta U_1 = 0,1$ В. Через второй ряд контактов при помощи движка $D2$ можно пропустить ток, равный 0,1 части I_p , который в каждом резисторе будет вызывать падение напряжения $\Delta U_2 = 0,01$ В. Через третий ряд контактов при помощи движка $D3$ можно пропускать ток, равный $0,01 I_p$, через определенное число резисторов и получать в каждом резисторе падение напряжения $\Delta U_3 = 0,001$ В. Таким образом, если на рисунке показан момент компенсации, то измеряемое напряжение $U_x = 0,643$ В.

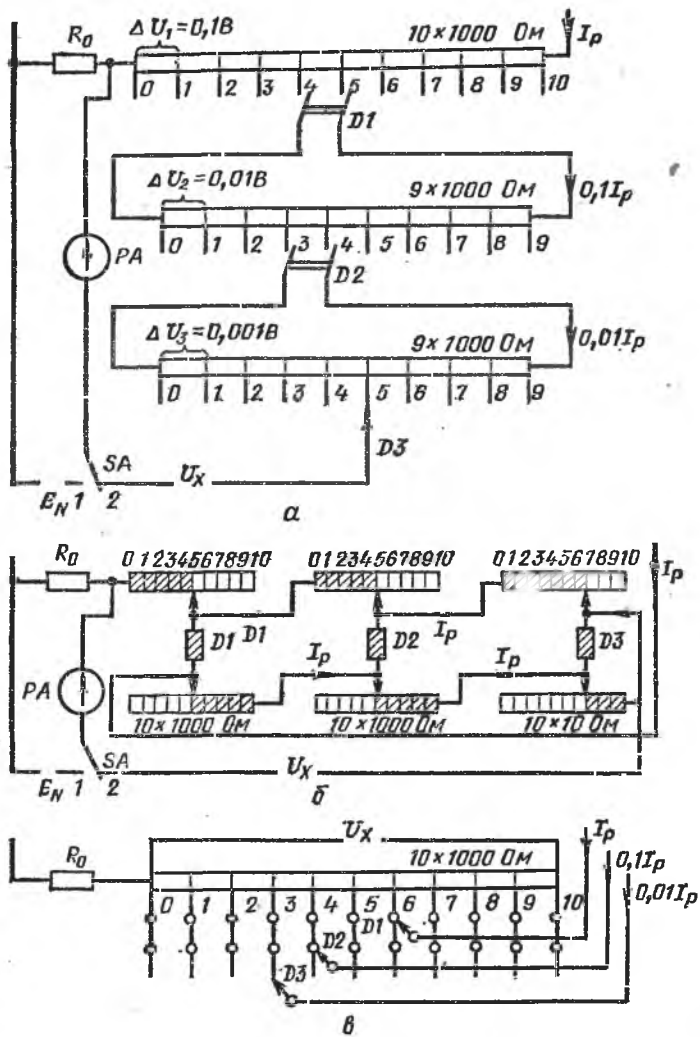


Рис. 13.4. Схемы компенсационных сопротивлений: а — с шунтирующей декадой; б — с двойной декадой; в — по схеме Уманцева.

Вольтметр универсальный цифровой В7-23

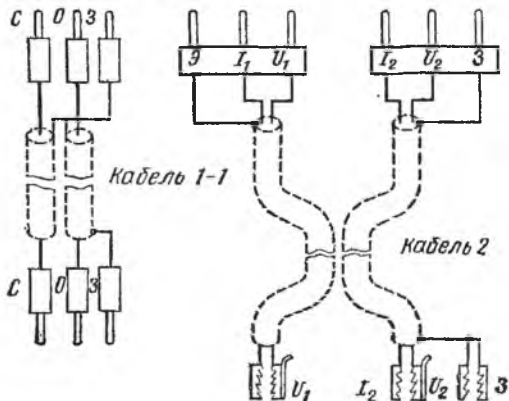
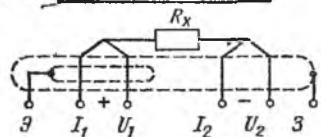
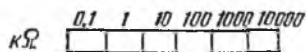
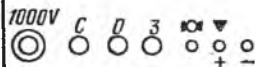
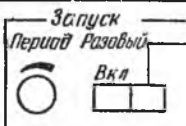
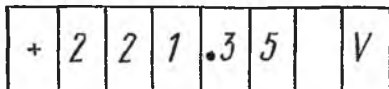


Рис. 13.5. Лицевая панель и входные кабели универсального цифрового вольтметра В7-23 со сменным блоком для измерения сопротивления.

Из рассмотренного выше видно, что непосредственно потенциометром можно измерять сравнительно небольшие напряжения, обычно в пределах до 2 В. Поэтому, если в сети напряжение больше 2 В, то необходимо это напряжение сначала снизить при помощи специального делителя напряжения. Обычно к потенциометрам прилагают такие делители напряжения (см. п. 10.1), при помощи которых можно к потенциометру подать 1/10 часть от напряжения сети, 1/100 или 1/500 часть. Измеряемое напряжение подают на вход делителя напряжения, а с выхода определенную часть этого напряжения подают к зажимам потенциометра и измеряют эту часть.

Для определения действительного напряжения измеренное его значение умножают на коэффициент уменьшения.

13.4. В чем особенность работы цифровых электронных вольтметров для измерения постоянного напряжения!

Цифровые вольтметры — один из самых распространенных видов ЦИП. К их достоинствам относится представление результата измерения в цифровой форме, исключающей субъективные погрешности, возможность автоматического выбора пределов измерений и полярности, быстродействие, возможность ввода данных в ЭВМ.

Основная погрешность цифровых вольтметров постоянного напряжения нормируется пределом допускаемой общей погрешности $\delta_{\text{доп}}$ (см. п. 6.7) и на уровне 1 В составляет 0,3...0,003%.

Для примера рассмотрим цифровой универсальный вольтметр типа В7-23. Прибор предназначен для измерения напряжений постоянного тока от 10 мкВ до 1000 В на поддиапазонах 0,1; 1; 10; 100; 1000 В и сопротивления постоянному току от 0,01 Ом до 10 МОм на поддиапазонах 0,1; 1; 10; 100 кОм; 1; 10 МОм. Прибор имеет дистанционный запуск и выход на цифропечатающее устройство. Поставляется в комплекте со сменными блоками Я1В-13 и Я1В-14.

На рисунке 13.5 изображена лицевая панель универсального цифрового вольтметра В7-23 со сменным блоком для измерения сопротивления.

Диапазон измерений может устанавливаться автоматически — для этого нужно нажать клавишу *Авт* или вручную — для этого при измерении напряжения нужно нажать одну из пяти клавиш с обозначениями от 0,1 до 1000 (цифры означают U_n в вольтах). Клавиша *ДУ* (дистанционное управление) должна быть отпущена.

При измерении напряжения три штекера кабеля, имеющего обозначения 1—1, должны быть подключены к зажимам *С* (сигнал), *0* (общий) и *З* (защита). Три отверстия между зажимом *З* и клавишами дают доступ к переменным резисторам, при помощи которых устанавливают нуль (левое отверстие) и калибруют прибор (среднее и правое отверстия).

Питание прибора включается клавишей *Сеть*.

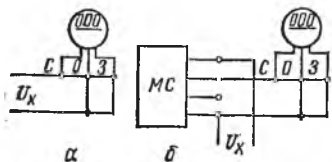


Рис. 13.6. Схемы подключения вольтметра В7-23 к источнику измеряемого напряжения: а — непосредственно; б — через делитель напряжения.

Схема подключения вольтметра непосредственно к источнику измеряемого напряжения показана на рисунке 13.6, а, а через делитель напряжения, в качестве которого используется магазин сопротивлений MC , — на рисунке 13.6, б. Коэффициент деления следует выбирать так, чтобы приблизительно обеспечить $U_x = U_n$, где U_n — номинальное значение напряжения на выбранном поддиапазоне.

13.5. Что необходимо знать при измерении больших напряжений приборами, подключенными через измерительный трансформатор напряжения?

Применение трансформаторов напряжения в измерительных цепях позволяет использовать для измерения высоких напряжений измерительные механизмы, рассчитанные на небольшие напряжения, а также обеспечивает безопасность обслуживающего персонала. Первичную обмотку трансформатора напряжения включают параллельно измеряемому напряжению, а во вторичную цепь включают измерительный прибор. Значение измеряемого напряжения определяют по формуле

$$U_x = U_2 k_n,$$

где U_2 — показание вольтметра; k_n — коэффициент трансформации, указываемый в табличке измерительного трансформатора напряжения.

Так как погрешности трансформатора зависят от нагрузки во вторичной цепи (см. п. 10.2), то необходимо так ограничивать число включенных приборов, чтобы их суммарная мощность не превышала номинальной мощности трансформатора, обычно указываемой в табличке трансформатора.

Один из зажимов вторичной обмотки заземляют, иначе при пробое изоляции напряжение между вторичной обмоткой и землей может достигнуть значения, опасного для обслуживающего персонала.

13.6. Как измерить напряжение в трехфазной сети?

В трехфазной сети различают три линейных и три фазных напряжения. Если трехфазная система симметрична, то есть все линейные и все фазные напряжения равны между собой и сдвинуты по фазе на 120° , то в этом случае достаточно иметь два вольтметра, предназначенных для измерения переменного напряжения промышленной частоты. Один из них включают на любое линейное напряжение, а другой — на любое фазное.

На рисунке 13.7, а первый вольтметр измеряет линейное напряжение U_{AB} , а второй вольтметр — фазное напряжение U_A . Если система линейных напряжений несимметрична, то необходимо включить три вольтметра для измерения линейных напряжений и три вольтметра для измерения фазных напряжений у потребителя U'_A , U'_B и U'_C (рис. 13.7, б).

Зная значения всех линейных напряжений, при помощи циркуля строят треугольник линейных напряжений. Сначала проводят

вектор U_{BC} (направление его может быть взято любым, так как он вращается с угловой скоростью ω против часовой стрелки). Обычно его располагают горизонтально (рис. 13.7, в). Далее из точки B делают циркулем засечку с радиусом, равным U_{AB} , а из точки C — засечку радиусом U_{CA} . Так находят точку A . Затем из точки A проводят дугу радиусом фазного напряжения U'_A . Из точки B — дугу радиусом U'_B , а из точки C — дугу радиусом U'_C . Точка пересечения дуг дает положение нулевой точки потребителя O' . Соединяя точку O' с точками A, B, C , получают векторы фазных напряжений U'_A, U'_B и U'_C . Из векторной диаграммы наглядно видно соотношение между фазными напряжениями и смещение углов сдвига фаз между ними. Кроме того, можно найти графически напряже-

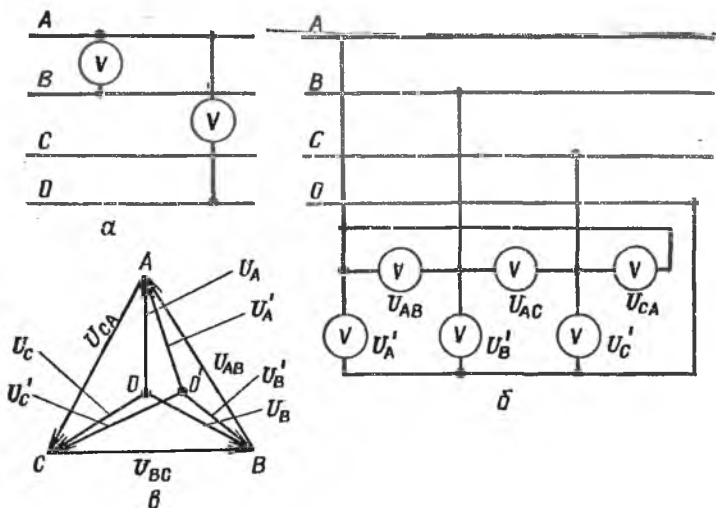


Рис. 13.7. Схемы включения вольтметров в низковольтную трехфазную сеть (а, б) и векторная диаграмма линейных и фазных напряжений (в).

ние смещения между нейтралью генератора (точкой O) и нейтралью потребителя O' , то есть напряжение между нулевыми точками генератора и потребителя (рис. 13.7, в).

13.7. Как измерить напряжение в высоковольтной сети трехфазного переменного тока?

В высоковольтной сети для измерения линейных и фазных напряжений требуется установить три однофазных измерительных трансформатора напряжения. Схема включения вольтметров показана на рисунке 13.8, а.

Три вольтметра включают на линейные напряжения между началами вторичных обмоток U_{ab}, U_{bc} и U_{ca} (рис. 13.8, а). Три вольт-

метра подключают между началом вторичных обмоток и нулевой точкой O и измеряют фазные напряжения U'_a, U'_b, U'_c .

Для определения действительного напряжения в сети надо все показания вольтметров умножить на коэффициент трансформации, так как при соединении первичной и вторичной обмоток трансформатора звездой (схема соединения «звезда — звезда») коэффициенты трансформации линейный и фазный одинаковы.

Для измерения только линейных напряжений достаточно двух трансформаторов напряжения. Вторичные обмотки трансформаторов включают по схеме открытого треугольника, то есть конец первой вторичной обмотки соединяют с началом второй вторичной обмотки (рис. 13.8, б). Вольтметры включают между точками a, b и c на напряжения U_{ab}, U_{bc} и U_{ca} . Показания вольтметров умножают на коэффициент трансформации.

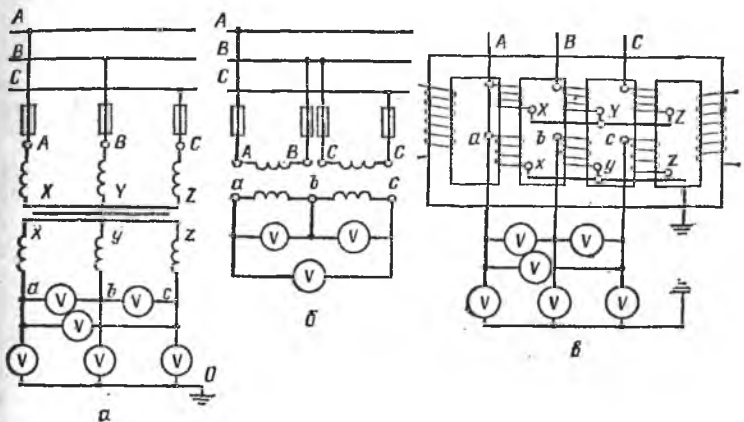


Рис. 13.8. Схемы включения вольтметров в высоковольтную трехфазную сеть при помощи:

а — трех трансформаторов напряжения; *б* — двух трансформаторов напряжения; *в* — пятистержневого трансформатора напряжения.

На практике получили распространение пятистержневые измерительные трансформаторы типа НТМИ-10 (рис. 13.8, в). В таком трансформаторе как бы соединены три однофазных трансформатора, во вторичные обмотки их включены вольтметры, как в схеме на рисунке 13.8, а.

Основная особенность такого трансформатора, являющаяся его преимуществом, заключается в том, что на боковых стержнях намотаны вспомогательные обмотки. Если в сети происходит замыкание одной из фаз на землю, то вольтметр этой фазы показывает нулевое значение, нарушается симметрия магнитных потоков в магнитопроводе. Их сумма становится не равной нулю, вспомогательные обмотки пронизываются результирующим потоком, в них наводится ЭДС и появляется ток, который дает сигнал о замыкании.

13.8. Как измерить напряжение при помощи электронно-лучевого осциллографа!

Для измерения и исследования изменения напряжения во времени часто используют электронно-лучевые осциллографы (см. п. 7.2). Если необходимые измерения сравнительно просты и их желательно выполнять при минимальном числе регулировок, удобнее применять моноблочный осциллограф.

После выбора типа осциллографа (см. п. 7.3) следует подключить к нему объект измерения, а осциллограф заземлить. При использовании широкополосных и высокочувствительных осциллографов нужно стараться уменьшить длины как сигнальных проводов, так и заземления, так как индуктивность провода длиной 20...25 см может сильно исказить фронт быстро нарастающего сигнала. Особенно важно это учитывать для источников измеряемого напряжения с низким выходным сопротивлением.

Для того чтобы избежать искажения амплитуды или формы исследуемого сигнала, реактивная составляющая сопротивления исследуемой схемы должна быть во много раз меньше реактивной составляющей входного сопротивления осциллографа. Например, если их отношение равно 1 : 100, то погрешность будет около 1 %, а если 1 : 10, то погрешность будет $\approx 9\%$.

Если время нарастания осциллографа составит не больше $1/3$ времени нарастания рассматриваемого сигнала, то при измерении, например, длительности фронтов импульсов погрешность составит не более 5 %.

Верхний предел исследуемого напряжения зависит от переходной емкости в приборах с закрытым входом и от допустимого напряжения на входе усилителя в транзисторных осциллографах с усилителями постоянного тока. При работе с большими сигналами следует использовать выносные делители — пробники, уменьшающие влияние нагрузки. Типичный делитель — пробник с коэффициентом деления 10 : 1 уменьшает емкостную нагрузку в 4...5 раз; а пробник с коэффициентом 50 : 1 — в 10 раз. В последнем случае можно исследовать сигналы напряжением до 500 В.

При выборе скорости развертки следует учитывать следующее. Обычно цена деления самой быстрой развертки близка к 3τ , где τ — длительность установления канала вертикального отклонения. Такое соотношение выбирают потому, что при большей скорости развертки канал вертикального отклонения не позволит рассмотреть более мелкие детали исследуемого сигнала, а при меньшей скорости возможности канала вертикального отклонения нельзя использовать.

Перепады напряжений и однократные импульсы длительностью до 10 нс могут регистрироваться осциллографом С7-10А, периодические сигналы — стробоскопическими осциллографами (С7-11, С7-13), импульсы 10...20 нс — осциллографом С1-31 или С1-71, импульсы 0,1 мкс и более — универсальными осциллографами. Медленно изменяющиеся процессы (10 с и более) регистрируются на самых медленных развертках — 5 с/дел. или 10 с/см (С1-19, С1-48Б, С1-76), а еще более медленные — запоминающими осциллографами.

Вначале перед исследованием измеряемого напряжения проводят калибровку (проверку значений масштабных коэффициентов) осциллографа в пиковых значениях измеряемого напряжения. Пос-

ле этого напряжение в любой точке осциллограммы измеряют непосредственно на экране. Для калибровки осциллографа с открытым входом к входу Y подключают источник постоянного напряжения. Размеры изображения сравнивают с установленным масштабом. Если наблюдается расхождение между известным значением напряжения и измеренным по шкале, то, регулируя усиление канала Y и длительность развертки, устраняют это расхождение.

Если необходимо измерить длительность импульса напряжения, длительность его фронта или спада, то скорость развертки следует установить такой, чтобы измеряемый фрагмент занял на экране 4...10 делений горизонтальной шкалы. Поэтому желательно иметь длительность установления осциллографа (указанную в паспорте) на порядок меньше измеряемой.

Истинную длительность трапецеидального (прямоугольного) импульса отсчитывают по шкале осциллографа на уровне 0,5 амплитудного значения. Истинная длительность вершины импульса на уровне 0,9 амплитудного значения больше видимой на экране на значение

$$\Delta = t_{\phi} - \sqrt{t_{\phi}^2 - t_y^2},$$

где t_y — длительность установления осциллографа; t_{ϕ} — кажущаяся (измеренная на экране) длительность фронта.

Длительность спада определяют аналогично, при этом на экране измеряют кажущуюся длительность спада $t_{\text{сп}}$ на уровне 0,1 амплитудного значения, при этом погрешность составляет

$$\Delta = t_{\text{сп}} - \sqrt{t_{\text{сп}}^2 - t_y^2}.$$

Таким же образом определяют длительность, если изображение импульса на экране имеет плоскую вершину.

Измерить период сигнала напряжения можно так же, как и длительность. Но более точный результат будет получен, если измерить длительность 5...10 периодов, развернув их на весь экран, а затем разделить ее на соответствующее число периодов.

Измерить частоту и фазу исследуемого напряжения можно по фигурам Лиссажу (см. пп. 18.4 и 19.2), если сигнал имеет простую форму. Максимальная измеряемая частота ограничена полосой пропускания осциллографа.

Глава 14. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

14.1. Как и какими средствами измерений можно измерить мощность в цепи постоянного тока!

Известно, что мощность приемника, включенного в цепь постоянного тока, зависит от напряжения U на его зажимах и тока I . Значение мощности можно определить по формуле

$$P = UI = IR^2 = U^2/R = U^2g, \quad (14.1)$$

где R — сопротивление приемника (нагрузки), Ом; g — проводимость приемника, См.

Из (14.1) видно, что мощность в цепи постоянного тока можно измерить несколькими косвенными методами.

Один из таких методов, получивший широкое распространение, — метод измерения мощности в цепи постоянного тока магнитоэлектрическими амперметром и вольтметром. Метод на первый взгляд очень простой: включить амперметр последовательно с нагрузкой, вольтметр параллельно, снять их показания и перемножить. Однако при использовании этого метода необходимо учитывать сопротивление приемника и в зависимости от этого выбирать схему включения приборов. Почему на это следует обращать внимание?

Если вольтметр включен по схеме, изображенной на рисунке 14.1, а, то, перемножив показания приборов, получают

$$P = UI = (U_A + U_R) I = U_A I + U_R I = \Delta P_A + P_n, \quad (14.2)$$

где U_A — падение напряжения в амперметре, В; U_R — падение напряжения в приемнике, В; P_n — мощность приемника, Вт.

Из формулы (14.1) видно, что измеренное значение мощности P оказывается больше действительной мощности приемника P_n на

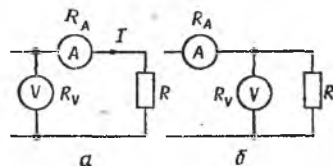


Рис. 14.1. Схемы включения амперметра и вольтметра при измерении мощности приемника:

а — с большим сопротивлением; б — с малым сопротивлением.

величину ΔP_A , следовательно, относительная погрешность измерения

$$\delta = (\Delta P_A / P) 100 = (R_A / R) 100.$$

Отсюда видно, что чем больше сопротивление приемника R и чем меньше сопротивление амперметра R_A , тем с большей точностью можно измерить мощность.

При включении приборов по схеме, приведенной на рисунке 15.1, б, произведение показаний вольтметра и амперметра равно

$$P = UI = U_R (I_V + I_n) = U_R I_V + U_R I_n = \Delta P_V + P_n,$$

где I — ток, проходящий в цепи, А; I_V — ток, проходящий через вольтметр, А; ΔP_V — мощность, потребляемая вольтметром, Вт.

В данном случае измеренное значение мощности оказалось больше действительной мощности приемника на величину ΔP_V , то есть погрешность в результат измерения вносит вольтметр. Относительная погрешность

$$\delta = (\Delta P_V / P) 100 = (R / R_V) 100.$$

Отсюда видно, что чем меньше сопротивление потребителя R и чем больше сопротивление вольтметра R_V , тем с большей точностью можно измерить мощность.

Итак, если потребитель имеет большое сопротивление, то вольтметр надо включать до амперметра, а если малое, то после амперметра, с тем чтобы получить меньшую погрешность измерения мощности. В случае неправильного выбора схемы, даже имея очень точные приборы, можно измерить мощность с большой погрешностью.

Мощность в цепи постоянного тока лучше всего измерять непосредственно электродинамическими и ферродинамическими ватт-

метрами. Их пределы измерений по току и напряжению следует выбирать такими, чтобы при заданных мощностях ваттметр работал в конце шкалы прибора. Кроме того, значения напряжения и тока в измерительной цепи не должны превышать номинальных значений тока и напряжения ваттметра.

14.2. Как включить ваттметр в цепь постоянного тока?

Дан ваттметр на номинальный ток 5 А и номинальное напряжение 300 В. Как его включить в сеть?

Если ток нагрузки I_1 меньше допустимого тока, то есть в данном случае меньше 5 А, и если напряжение в измерительной цепи меньше допустимого напряжения катушки, то есть меньше 300 В, то схема включения имеет следующий вид (рис. 14.2, а): сначала

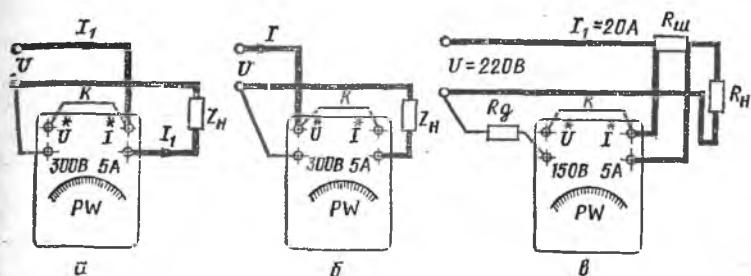


Рис. 14.2. Схемы включения ваттметра:

а — непосредственно в сеть правильно; б — неправильно; в — в сеть с большим напряжением и большим током.

включают последовательную катушку — собирают токовую цепь (на рисунке показана жирной линией), затем собирают цепь напряжения, для этого начало катушки напряжения при помощи переключки K подключают к началу токовой катушки, соединенной с одним из зажимов сети, а конец катушки напряжения присоединяют к другому зажиму сети.

Иногда при выполнении токовой цепи в нее включают сопротивление переключки (рис. 14.2, б). Этого делать нельзя, так как в этом случае через переключку проходит рабочий ток, а не малый ток цепи напряжения, как в рассмотренной ранее схеме. Кроме того, в цепи токовой катушки, имеющей малое сопротивление, добавляется сопротивление самой переключки и два контактных переходных сопротивления. Все это приводит к появлению дополнительной погрешности при измерении мощности.

Если шкала прибора не отградуирована в единицах мощности (например, в многопредельном электродинамическом ваттметре), но имеет определенное число делений N , то для измерения мощности на данном пределе измерений следует определить цену деления ваттметра по формуле:

$$C_H = U_H I_H / N,$$

где U_H — номинальное напряжение прибора или предел измерений по напряжению, В; I_H — номинальный ток прибора, допустимый

ток прибора, или предел измерений по току, А; N — число делений шкалы прибора (обычно 100 или 150).

Пусть дан прибор с $U_n=150$ В, $I_n=5$ А и $N=150$. Тогда цена деления прибора

$$C_n = 150 \cdot 5 / 150 = 5 \text{ Вт/дел.}$$

Для того чтобы определить мощность по показаниям прибора, нужно показание прибора в делениях шкалы n умножить на цену деления C_n :

$$P = n C_n.$$

Если напряжение в сети больше допустимого напряжения катушки напряжения, а ток больше допустимого тока токовой катушки, то необходимо в цепи постоянного тока для подключения прибора воспользоваться добавочным резистором и шунтом (рис. 14.2, в).

14.3. Как рассчитать сопротивления добавочного резистора и шунта для подключения ваттметра в цепь постоянного тока!

Значение сопротивления шунта для схемы, приведенной на рисунке 14.2, в, можно определить по формуле

$$r_{ш} = r_A / (p - 1) = r_A / (I / I_n - 1), \quad (14.3)$$

где r_A — сопротивление токовой катушки ваттметра, Ом; p — коэффициент шунтирования,

а значение сопротивления добавочного резистора — из выражения

$$r_d = r_V (q - 1) = r_V (U / U_n - 1), \quad (14.4)$$

где r_V — сопротивление катушки напряжения ваттметра, Ом.

Например, для ваттметра с номинальным напряжением катушки напряжения $U_n=150$ В и номинальным током токовой катушки $I_n=5$ А, включенного в измерительную цепь напряжением 220 В (рис. 14.2, в) с током около 20 А, необходимо рассчитать сопротивления добавочного резистора и шунта.

Значение сопротивления шунта

$$r_{ш} = r_A / (20/5 - 1) = r_A / 3, \quad (14.5)$$

то-есть необходим шунт, сопротивление которого меньше сопротивления токовой цепи прибора в три раза.

Сопротивление добавочного резистора

$$r_d = r_V (220/150 - 1) = 0,46 r_V. \quad (14.6)$$

Действительное значение мощности

$$P = P_W p q,$$

где P_W — показание ваттметра, если его шкала отградуирована в единицах мощности.

Если прибор подключен через шунт, то цену деления можно определить так;

$$C_n' = (U_n I_n / N) q p = C_n q p.$$

В приведенном примере $p=4$, а $q=1,46$, следовательно, показание ваттметра следует умножить на 5,86, чтобы определить действительное значение мощности, что неудобно. Поэтому при подборе шунта и добавочного резистора стремятся принимать коэффициенты q и p равными целым числам.

В данном примере удобно принять $p=5$, а $q=2$, то есть $r_{ш}=r_A/4$ и $R_d=r_V$, тогда измеренное значение мощности можно определять, умножая показания прибора на 10. Новая цена деления ваттметра будет равна

$$C_n^* = 150 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 5 / 150 = 50 \text{ Вт/дел.},$$

где $150 \cdot 2 = 300 \text{ В}$ — новый предел измерений по напряжению; $5 \cdot 5 = 25 \text{ А}$ — новый предел измерений по току.

Наружный добавочный резистор следует включать только после обмотки напряжения, а не перед ней, иначе потенциал подвижной катушки относительно неподвижной может достигнуть опасных для изоляции значений.

14.4. Какими методами можно измерить активную мощность в однофазной цепи переменного тока?

Значение активной мощности в однофазной цепи переменного тока определяют по формуле

$$P = UI \cos \varphi,$$

где U — напряжение приемника, В; I — ток приемника, А; φ — фазовый сдвиг между напряжением и током.

Из формулы видно, что мощность в цепи переменного тока можно определить косвенным путем, если включить три прибора: амперметр, вольтметр и фазометр. Однако в этом случае нельзя рассчитывать на большую точность измерения, так как погрешность измерения мощности будет зависеть не только от суммы погрешностей всех трех приборов, но и от погрешности метода измерения, вызванной способом включения амперметра и вольтметра. Поэтому данный метод можно применять только в случае, когда не требуется большая точность измерений.

Если активную мощность нужно измерить точно, то лучше всего применить ваттметры электродинамической системы или электронные ваттметры. При грубых измерениях могут быть использованы ферродинамические ваттметры. Обычно в лабораторных условиях пользуются электродинамическими, а в производственных — ферродинамическими ваттметрами.

Если напряжение в цепи меньше предела измерений ваттметра по напряжению, ток нагрузки меньше допустимого тока прибора, то схема включения ваттметра в цепь переменного тока аналогична схеме включения ваттметра в цепь постоянного тока. То есть токовую катушку включают последовательно с нагрузкой, а обмотку напряжения — параллельно нагрузке.

При подключении электродинамических ваттметров следует учитывать, что они полярны не только в цепи постоянного, но и в цепи переменного тока. Чтобы обеспечить правильное (в сторону шкалы) отклонение стрелки прибора от нуля, начала обмоток на

панели прибора обозначены точкой или звездочкой. Зажимы, помеченные таким образом, называют генераторными, так как именно их подключают к источнику энергии.

Неподвижную катушку ваттметра можно включать последовательно с нагрузкой только при токах нагрузки 10...20 А. Если ток нагрузки больше, то токовую катушку ваттметра включают через измерительный трансформатор тока.

Для измерения мощности в цепи переменного тока с низким коэффициентом мощности следует применять специальные низкокосинусные ваттметры. На их шкале указано, для каких значений $\cos \varphi$ они предназначены.

Когда $\cos \varphi < 1$, то для исключения перегрузки электродинамического ваттметра нужно включать контрольные амперметр и вольтметр. Например, ваттметр с номинальным током $I_n = 5$ А может показать полное отклонение при токе $I = 5$ А и $\cos \varphi = 1$ и при токе $I = 6,25$ А и $\cos \varphi = 0,8$ (так как $I = I_n / \cos \varphi$). Во втором случае ваттметр будет перегружен.

14.5. Как включить ваттметр в цепь переменного тока, если ток нагрузки больше допустимого!

Если ток нагрузки больше допустимого тока ваттметра, то токовую катушку ваттметра включают через измерительный трансформатор тока (рис. 14.3, а).

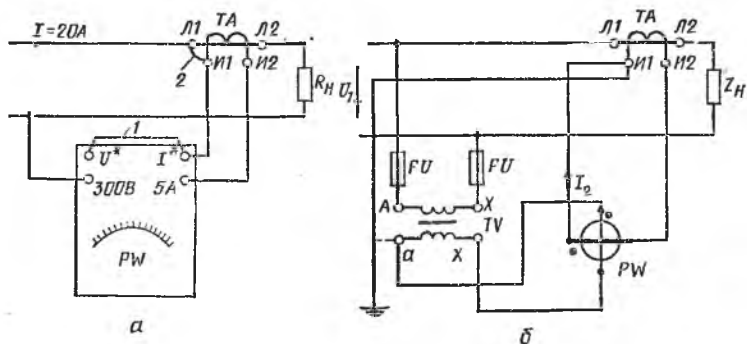


Рис. 14.3. Схемы включения ваттметра в цепь переменного тока с большим током (а) и в высоковольтную сеть (б).

При выборе трансформатора тока необходимо следить за тем, чтобы номинальный первичный ток трансформатора $I_{1н}$ был равен измеряемому току в сети или больше него.

Например, если значение тока в нагрузке достигает 20 А, то можно брать трансформатор тока, рассчитанный на первичный номинальный ток 20 А с номинальным коэффициентом трансформации по току

$$k_{HI} = I_{1н} / I_{2н} = 20 / 5 = 4.$$

Если при этом в измерительной цепи напряжение меньше допустимого прибором, то катушку напряжения включают непосредственно

венно на напряжение нагрузки. Начало катушки напряжения при помощи перемычки 1 подключают к началу токовой катушки. Так же обязательно устанавливают перемычку 2 (начало катушки подключают к сети). Конец катушки напряжения подключают к другому зажиму сети.

Для определения действительной мощности в измеряемой цепи необходимо показание ваттметра умножить на номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока:

$$P = P_W k_{нI} = P_W 4.$$

Если ток в сети может превышать 20 А, то следует выбрать трансформатор тока с первичным номинальным током 50 А, при этом

$$k_{нI} = 50/5 = 10.$$

В этом случае для определения значения мощности показания ваттметра надо умножать на 10.

14.6. Как включить ваттметр в высоковольтную сеть переменного тока!

При измерении мощности в высоковольтной сети переменного тока используют измерительные трансформаторы тока и напряжения (рис. 14.3, б). Токовую катушку ваттметра включают во вторичную обмотку трансформатора тока, катушку напряжения — во вторичную обмотку измерительного трансформатора напряжения.

Для определения действительной мощности в сети показания ваттметра умножают на коэффициенты $k_{нI}$ и $k_{нU}$ трансформации по току и напряжению:

$$P = P_W k_{нI} k_{нU}.$$

Из-за возможного появления высокого напряжения в цепи вторичных обмоток трансформатора начала обмоток заземляют.

Токовую катушку всегда следует включать через измерительный трансформатор тока, даже если ток в сети меньше допустимого тока прибора, так как если включить токовую катушку без измерительного трансформатора, то высокое напряжение будет подано на прибор, что недопустимо.

Для защиты обмоток измерительного трансформатора напряжения от появления возможного тока короткого замыкания первичную обмотку подключают через плавкие предохранители.

14.7. Как измерить активную мощность в трехфазной трехпроводной сети!

Если нагрузка в трехфазной трехпроводной сети симметричная и соединена в звезду, то для измерения мощности потребителя достаточно иметь один ваттметр. Его включают таким образом, чтобы он показал мощность одной фазы (см. п. 14.5, 14.6), тогда общая мощность будет больше показания ваттметра в 3 раза (рис. 14.4 а):

$$P = 3P_W.$$

Ваттметр подключают так. Токовую катушку включают на любой ток любой фазы, например, фазы А (рис. 14.4, а). Катушку

напряжения включают на напряжение этой же фазы, то есть между линейным проводом фазы и нулевой точкой потребителя. Если нулевая точка доступна, то к ней и подключают конец обмотки напряжения, как это показано на рисунке. Если нулевая точка недоступна или ее нет, что может быть при включении приемника электрической энергии по схеме треугольника, то можно получить искусственную нулевую точку.

Этот метод возможен только при использовании электродинамического ваттметра. Для этой цели подбирают три резистора r_1 , r_2 и r_3 так, чтобы $r_1 = r_3 = (r_2 + r_V)$, где r_V — сопротивление катушки напряжения ваттметра; r_2 — сопротивление добавочного резистора. Таким образом получают искусственный симметричный приемник с нулевой точкой. Катушка напряжения в этом случае оказывается под фазным напряжением (рис. 14.4, б).

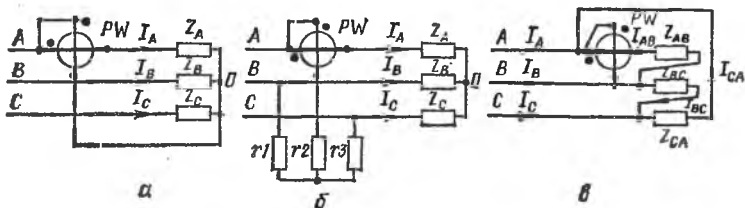


Рис. 14.4. Схемы включения ваттметра в трехпроводную сеть: а — с доступной нулевой точкой; б — с недоступной нулевой точкой; в — при включении потребителя электроэнергией треугольником.

При включении приемника треугольником токовую катушку включают на ток фазы, например фазы А (рис. 14.4, в) I_{AB} , а катушку напряжения — на напряжение фазы U_{AB} . Мощность трехфазного приемника определяется как

$$P = 3P_{W1}.$$

14.8. Как измерить активную мощность в трехпроводной сети, если нагрузка несимметричная!

Для этой цели можно использовать специальные ваттметры, например Д85. Если такого прибора нет, то можно взять три ваттметра и включить их в каждую фазу. Общая мощность будет равна сумме показаний трех ваттметров.

Мощность трехфазного несимметричного приемника можно измерить при помощи двух ваттметров, если включить их по схеме, показанной на рисунке 14.5, а, б.

Значение активной мощности трехфазного приемника можно определить по формуле

$$P = P_{W1} + P_{W2},$$

где $P_{W1} = U_{AC} I_A \cos \psi_1$ — показание первого ваттметра, Вт; ψ_1 — угол сдвига фаз между напряжением U_{AC} и током I_A ; $P_{W2} = U_{BC} I_B \cos \psi_2$ — показание второго ваттметра, Вт; ψ_2 — угол сдвига фаз между напряжением U_{BC} и током I_B .

14.9. В чем особенность измерения мощности при помощи двух ваттметров?

При измерении мощности двумя ваттметрами есть возможность не только сэкономить один ваттметр, но и по их показаниям судить ориентировочно о значении коэффициента мощности трехфазного приемника. Например, если нагрузка в фазах активная и симметричная то показания обоих ваттметров будут одинаковы. Это видно из векторной диаграммы (рис. 14.5, в). Токи совпадают

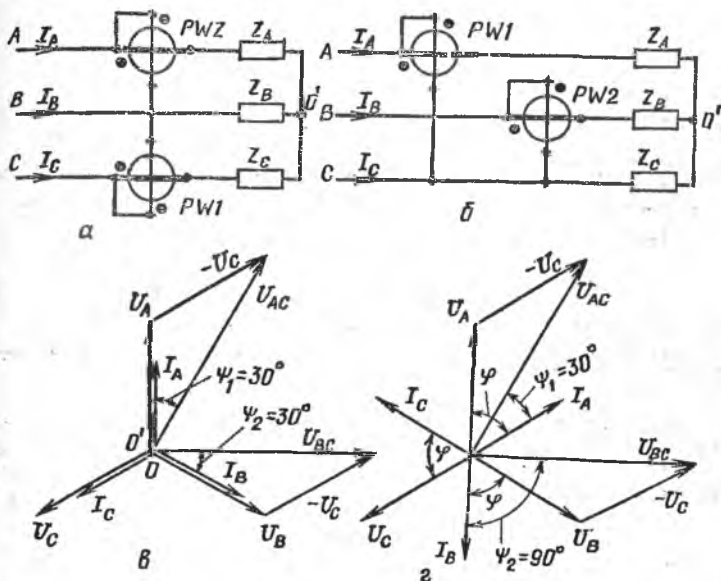


Рис. 14.5. Схема включения двух ваттметров в трехпроводную сеть (а, б) и векторные диаграммы напряжений и токов при $\cos \varphi = 1$ (в) и $\cos \varphi = 0,5$ (г).

по направлению с фазными напряжениями (приемник соединен звездой): ток I_A с напряжением U_A , а ток I_B с напряжением U_B , так как нагрузка активная. Угол ψ_1 между U_{AC} и I_A равен 30° , и угол ψ_2 между U_{BC} и I_B также равен 30° . Значения мощности, измеряемые ваттметрами, определяются одинаковыми выражениями:

$$P_{W1} = U_{AC} I_A \cos \psi_1 = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos 30^\circ;$$

$$P_{W2} = U_{BC} I_B \cos \psi_2 = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos 30^\circ.$$

Если нагрузка носит активно-индуктивный характер и $\cos \varphi = 0,5$, то есть угол $\varphi = 60^\circ$, то угол $\psi_1 = 30^\circ$, а угол $\psi_2 = 90^\circ$ (рис. 14.5, г). Показания ваттметров будут следующими:

$$P_{W1} = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos 30^\circ;$$

$$P_{W2} = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos 90^\circ.$$

Если показания одного из ваттметров становятся равными нулю, это значит, что $\cos \varphi$ уменьшился до 0,5.

Из диаграммы также видно, что если $\cos \varphi$ в сети станет меньше 0,5, то есть угол φ будет больше 60° , то угол ψ_2 станет больше 90° , а это приведет к тому, что показания второго ваттметра станут отрицательными, стрелка прибора начнет отклоняться в другую сторону (обычно в современных электродинамических ваттметрах предусмотрен переключатель направления тока в подвижной катушке). Общая мощность в этом случае равна разности показаний ваттметров.

Если нагрузка симметрична, то по показаниям двух ваттметров можно точно вычислить значение $\cos \varphi$ по формуле

$$\cos \varphi = P/S = P/\sqrt{P^2 + Q^2},$$

где $P = P_{W1} + P_{W2}$ — активная мощность трехфазного приемника, Вт; $Q = \sqrt{3}(P_{W1} - P_{W2})$ — реактивная мощность трехфазного приемника.

Последнее выражение показывает, что если разность показаний двух ваттметров умножить на $\sqrt{3}$, получится значение реактивной мощности трехфазного приемника.

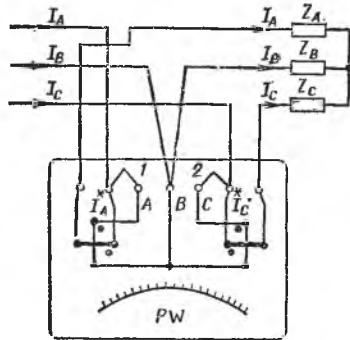


Рис. 14.6. Схема включения двухэлементного ваттметра в трехпроводную трехфазную сеть.

переключки 1 и 2, при помощи которых подключают начала обмоток напряжения. Концы катушек напряжения внутри прибора выведены к клемме В.

Промышленность выпускает специальные двухэлементные ваттметры.

14.10. Как выполнены ваттметры для измерения активной мощности в трехфазной сети?

Такие ваттметры в одном корпусе имеют две неподвижные токовые катушки напряжения, расположенные на одной оси со стрелкой (рис. 14.6). При подключении ваттметра линейные провода А и С, идущие от генератора, подключают к началам токовых катушек I_A и I_C , провод В — к зажиму В ваттметра, и ставят две пере-

14.11. Как измерить активную мощность в трехфазной четырехпроводной сети?

Для измерения мощности в трехфазной четырехпроводной сети можно воспользоваться одним из ваттметров, для этого предназначенных. Если такого прибора нет, то при симметричной нагрузке для измерения мощности в четырехпроводной сети достаточно вклю-

чить один ваттметр в любую фазу приемника, например в фазу А (рис. 14.7, а). Тогда значение мощности трехфазного приемника можно определить как $P=3P_W$.

Если нагрузка несимметрична, то нужно включить три ваттметра (рис. 14.7, б) — в каждую фазу по ваттметру. Тогда сумма

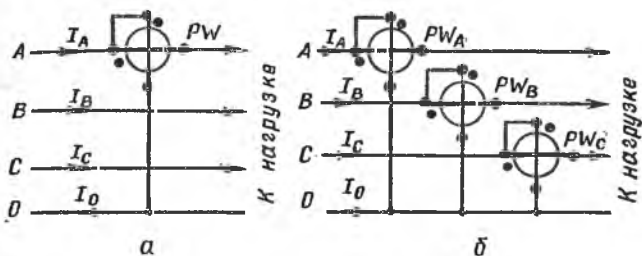


Рис. 14.7. Схема включения ваттметров в четырехпроводную трехфазную сеть:

а — при симметричной нагрузке; б — при несимметричной нагрузке.

показаний трех ваттметров будет давать значение активной мощности трехфазного приемника:

$$P = P_A + P_B + P_C,$$

где P_A, P_B, P_C — показания ваттметров, включенных соответственно в фазу А, В, С.

14.12. Как измерить активную мощность в трехфазной высоковольтной цепи!

В высоковольтной цепи при измерении мощности необходимо использовать измерительные трансформаторы тока и напряжения. При этом токовые катушки ваттметра включают во вторичные цепи трансформаторов тока, катушки напряжения — через измерительные трансформаторы напряжения, вторичные обмотки которых включены по схеме открытого треугольника (рис. 14.8). К зажиму а подключают начало одной катушки напряжения, к зажиму с — начало другой катушки, а концы их присоединяют к общему зажиму б.

С целью защиты приборов от возможных переходов высокого напряжения на низкую сторону заземляют начальные зажимы вторичных обмоток трансформаторов токов и общую точку вторичных обмоток трансформаторов напряжения.

14.13. Как устроен варметр для измерения реактивной мощности в трехфазной сети!

В варметре для измерения реактивной мощности в трехфазной сети имеются две основные токовые катушки и две вспомогательные. Основные токовые катушки обычно включают так: одну на ток I_A , другую — на ток I_C . Вспомогательные обмотки включают по-

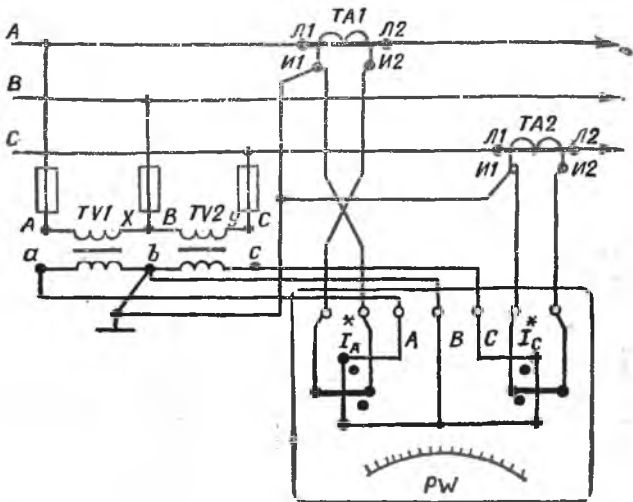


Рис. 14.8. Схема включения двухэлементного ваттметра в высоковольтную сеть.

следовательно в фазу B и встречно (на схеме рисунка 14.9, a — начало катушек обозначены точкой).

В этом приборе сумма четырех вращающих моментов пропорциональна реактивной мощности трехфазного приемника, и при соответствующей градуировке шкалы прибора им можно измерять реактивную мощность трехфазного приемника при любой нагрузке.

На рисунке 14.9, b показана еще одна возможная схема включения варметра для измерения реактивной мощности в трехфазной трехпроводной сети. При соответствующем подборе добавочных резисторов R_d показание двухэлементного прибора пропорционально реактивной мощности трехфазного приемника.

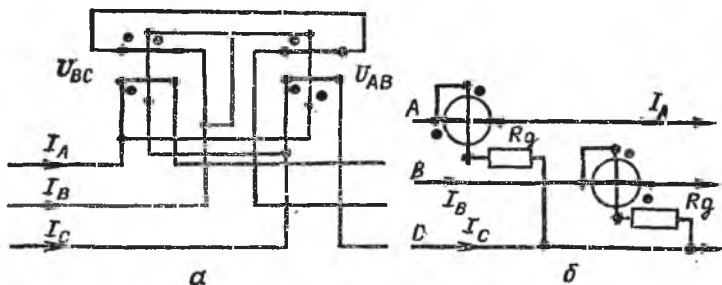


Рис. 14.9. Схемы включения варметров при измерении реактивной мощности при симметричной нагрузке,

По этим и другим подобным схемам переключают катушки напряжения и тока у трехфазных ваттметров при помощи специального переключателя, и трехфазный ваттметр становится трехфазным ваттметром.

Промышленность выпускает такие универсальные приборы, как ваттметры типа Д5031 и Д309, самопишущий прибор типа Н348.

14.14. Какими косвенными методами можно измерить реактивную мощность?

Реактивную мощность в однофазной сети переменного тока можно измерить косвенным методом при помощи амперметра, вольтмет-

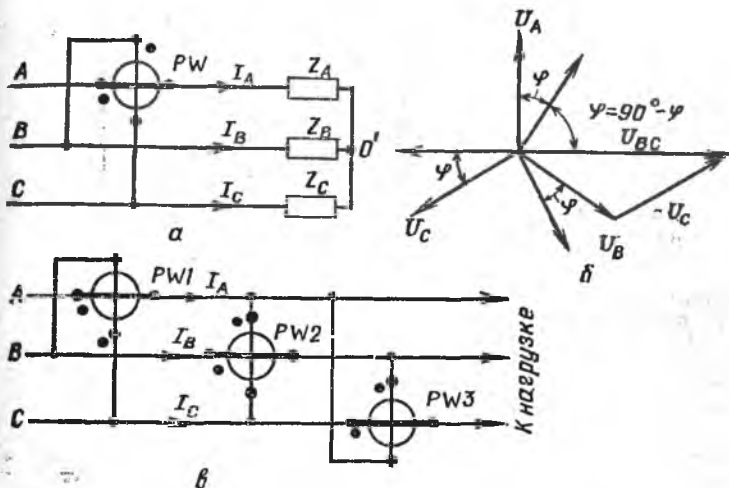


Рис. 14.10. Схемы включения ваттметров в трехфазную сеть (а и в) и векторная диаграмма напряжений и токов при симметричной нагрузке (б).

ра и ваттметра. Значение реактивной мощности можно определить по формуле

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(UI)^2 - P^2},$$

где S — полная мощность, В·А; P — показания ваттметра, Вт; U — показания вольтметра, В; I — показания амперметра, А.

В трехфазной сети переменного тока при симметричной нагрузке реактивную мощность можно измерить при помощи одного ваттметра (рис. 14.10, а). При этом его токовую катушку включают на ток любой фазы, например фазы А, а катушку напряжения — на другие фазы, то есть В и С (напряжение U_{BC}). Ваттметр покажет значение произведения тока I_A на напряжение U_{BC} и на косинус угла сдвига фаз между ними:

$$P_W = U_{BC} I_A \cos \psi.$$

Угол ψ можно определить из векторной диаграммы (рис. 14.10, б). Допустим, нагрузка носит активно-индуктивный характер, ток в каждой фазе отстает от напряжения на угол φ , тогда угол ψ равен $90^\circ - \varphi$. Следовательно, значение мощности, измеренной ваттметром, составляет

$$P_W = U_{BC} I_A \cos(90 - \varphi) = U_{\pi} I_{\pi} \sin \varphi.$$

Если это выражение сравнить с формулой реактивной мощности трехфазного приемника: $Q = U_{\pi} I_{\pi} \sqrt{3} \sin \varphi$, то видно, что если показание ваттметра умножить на $\sqrt{3}$, получится значение реактивной мощности трехфазного приемника.

При несимметричной нагрузке в трехфазной сети переменного тока реактивную мощность можно определить при помощи трех ваттметров, токовые катушки которых включены на линейные токи I_A , I_B и I_C , а катушки напряжения — на другие фазы, то есть соответственно U_{CB} , U_{AC} , U_{BA} (рис. 14.10, в).

В этом случае для определения значения реактивной мощности нужно сумму показаний трех ваттметров разделить на $\sqrt{3}$:

$$P = (P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}) / \sqrt{3}.$$

Ранее было показано, что реактивную мощность трехфазного приемника можно измерить при помощи двух ваттметров. В этом случае реактивная мощность трехфазного приемника определится, как

$$Q = \sqrt{3} (P_{W1} - P_{W2}),$$

где P_{W1} , P_{W2} — показания первого и второго ваттметров.

Глава 15. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

15.1. Какими методами и какими средствами измерений можно измерить потребляемую электрическую энергию в цепи постоянного и однофазного переменного тока?

Значение электрической энергии, потребляемой в цепи постоянного тока, определяется по формуле

$$W = Pt = UIt, \quad (15.1)$$

где P — мощность потребителя, Вт; t — время, за которое определяется потребляемая электрическая энергия, с; U — напряжение, подаваемое к приемнику, В; I — ток, потребляемый нагрузкой, А.

Из формулы (15.1) следует, что измерить потребляемую электрическую энергию можно косвенным методом, например при помощи ваттметра и секундомера или вольтметра, амперметра и секундомера. Точность результата косвенных измерений невелика и зависит от погрешности измерения в первом случае двух величин (P и t), а во втором трех величин (U , I и t) и схемы включения приборов.

Поэтому, если необходимо измерить потребляемую электри-

ческую энергию с большой точностью, то следует использовать счетчики активной энергии (счетчики киловатт-часов) постоянного тока. Счетчики киловатт-часов выпускают обычно специального назначения (табл. 15.1).

15.1. Техническая характеристика счетчиков киловатт-часов

Тип прибора	Назначение	Частота тока, Гц	Класс точности	Мощность, потребляемая в параллельной цепи (Вт), номинальный ток (А) и номинальное напряжение (В)
СО-И445Э, СО-И445Т СО-5У	Учет активной энергии в однофазной сети Учет активной энергии в помещениях, оборудованных бытовыми электроплитами	50...60 50	2,0 2,5	1,5 Вт 5 и 10 А, 127 и 220 В
СО-2МРЗ	Учет активной энергии однофазного тока	50...60	2,5	1,5 Вт
Ф441	Учет активной и реактивной энергии переменного тока, автономно и как датчики информационно-измерительных систем в трехфазных сетях	50	0,5	3×5 и 3×1 А, 3×58/100 В
САЗ-И674Т, САЗУ-И674Т, СА4-И675Т, СА4У-И675Т	Учет активной энергии в трехфазных трехпроводных и четырехпроводных сетях	50...60	1,0	3 Вт, 5...2000 А, 220 и 380 В
САЗ-И681, САЗУ-И681, СА4У-И682, СА4-И682	Учет активной энергии трехфазного тока с трансформаторами тока и напряжения	50	1,0	1...10 000 А, 380... 500 000 В

Для учета электрической энергии в однофазных сетях переменного тока частотой 50 Гц широко применяются счетчики киловатт-часов индукционной системы, например типа СО-2М, СО-5У, СО-И470, СО-И445Э и др.

Счетчик СО-2М класса точности 2,5; номинальное напряжение и ток соответственно 220 В и 5 и 10 А, 127 В, 5 и 10 А; перегрузка допустима до 200 % номинального тока; чувствительность 1 % при $\cos \varphi = 1$; потребляемая мощность 1,2 Вт.

Счетчик СО-2МТ имеет класс точности 2,5 при $\cos \varphi = 1$ и нагрузке 10 % номинального тока, погрешность $\pm 3,5$ %. При нагрузке 20, 100, 200 % номинального тока и $\cos \varphi = 1$ погрешность $\pm 2,5$ %, а при $\cos \varphi = 0,5$ она может быть ± 4 %. Изготавливают их на номинальные токи 5 и 10 А при напряжении 110, 127, 220, 230 В.

Счетчики СО-5 (СО-И470) изготовляют на номинальные токи 5, 10 А и номинальные напряжения 127 и 220 В, максимальный ток 15 и 20 А.

Схема включения однофазного счетчика в низковольтную сеть с током меньше номинального аналогична схеме включения ваттметра и показана на рисунке 15.1, а. Токовая катушка включается последовательно с нагрузкой, а катушка напряжения — параллельно ей.

Если ток нагрузки превышает номинальный ток счетчика, то его включают в сеть через измерительный трансформатор тока (рис. 15.1, б). При этом токовую катушку счетчика включают во вторичную цепь трансформатора тока, а катушку напряжения — на напряжение сети путем установки перемычки П между зажимами Л1

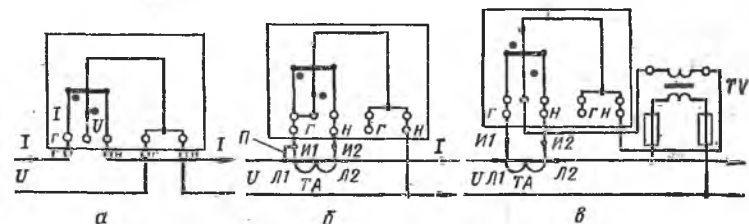


Рис. 15.1. Схема включения однофазного счетчика:

а — непосредственно в сеть; б — через трансформатор тока; в — через трансформатор тока и напряжения.

и И1 трансформатора тока. Для определения расхода электрической энергии показание счетчика умножают на коэффициент трансформации $k_{Н1}$.

Если напряжение в сети и ток нагрузки больше номинального напряжения и номинального тока счетчика, то счетчик включают в сеть через измерительные трансформаторы тока ТА и напряжения TV (рис. 15.1, в). В этом случае токовую катушку счетчика включают в цепь вторичной обмотки ТА, а цепь катушки напряжения — во вторичную цепь трансформатора напряжения TV.

Для определения потребляемой электрической энергии в сети следует показания счетчика, снятые за определенный период, умножить на номинальные коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов, то есть на $k_{Н1}$ и $k_{НУ}$.

15.2. Какие приборы применяют для измерения потребления активной электрической энергии в трехфазных цепях?

Для учета потребляемой активной электрической энергии в трехфазных цепях используют специальные счетчики активной энергии (табл. 15.1).

Для двух- и трехэлементных счетчиков введены следующие обозначения: СА3 — счетчики для учета активной энергии в трехфазной трехпроводной цепи; СА4 — счетчики для учета активной энергии в трехфазной четырехпроводной цепи; СР4 — счетчики для

учета реактивной энергии в трехфазных, трех- и четырехпроводных цепях.

В некоторых случаях к обозначению счетчиков добавляется буква У — универсальный. Эти счетчики предназначены для работы с измерительными трансформаторами тока и измерительными трансформаторами напряжения с любыми коэффициентами трансформации.

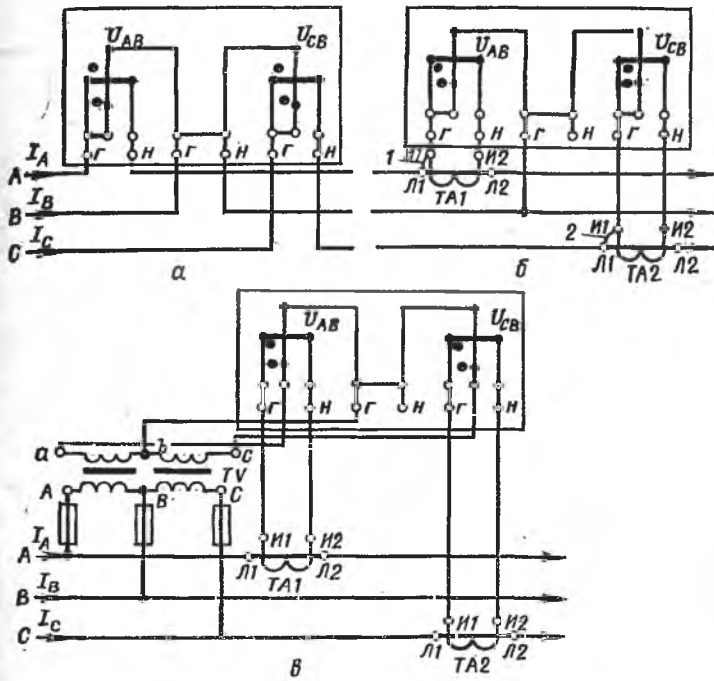


Рис. 15.2. Схема включения двухэлементного счетчика активной энергии:

а — непосредственно в сеть; *б* — при большом рабочем токе; *в* — при большом токе и напряжении.

По точности учета электрической энергии счетчики киловатт-часов могут быть следующих классов точности: 0,5; 1,0; 2,0 и 2,5.

Схема непосредственного включения трехфазного счетчика САЗ показана на рисунке 15.2, *а*.

15.3. Как включить трехфазный счетчик в низковольтную сеть с большим током?

Для подключения счетчика в низковольтную сеть с большим током нужно применить два трансформатора тока, выбранных по номинальному току так, чтобы он был несколько больше тока в

сети или равнялся ему. Выбранный трансформатор тока будет иметь определенный коэффициент трансформации k_{HI} . Значение электроэнергии, потребляемой из сети, определится по формуле

$$W = W_{сч} k_{HI},$$

где $W_{сч}$ — показание счетчика, кВт·ч.

Следует обратить внимание на необходимость установки двух перемычек 1 и 2, при помощи которых подключаются начала катушек напряжения к сети (рис. 15.2, б).

15.4. Как включить трехфазный счетчик активной электрической энергии в высоковольтную сеть?

При включении электрического счетчика в высоковольтную сеть подбирают два трансформатора тока и два трансформатора напряжения. Токковые катушки счетчика подключают во вторичные цепи измерительных трансформаторов тока. Катушки напряжения включают на вторичное напряжение измерительного трансформатора напряжения. При подключении этих катушек внутренние перемычки между началами токковых катушек напряжения убирают, и катушки напряжения включают независимо от токовой цепи (рис. 15.2, в).

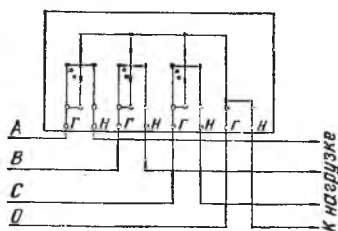


Рис. 15.3. Схема включения трехэлементного счетчика в четырехпроводную сеть.

В этом случае при определении потребляемой электрической энергии показания счетчика умножают на довольно большие числа. Так, например, при $U_{1H} = 10$ кВ и $I_1 = 100$ А надо взять трансформатор напряжения ТН-10 000/100 с $k_{HU} = 100$ и трансформатор тока ТК-100/5 с $k_{HI} = 20$. Следовательно, для определения потребляемой электроэнергии показание счетчика надо умножить на 2000, то есть цена одного деления счетчика становится очень весомой.

Схема включения счетчика САЧ показана на рисунке 15.3.

$$W = W_{сч} k_{HI} k_{HU}.$$

При больших первичных напряжениях и больших токах коэффициенты трансформации могут иметь большие значения. В этом

15.5. Какими средствами измерений и как измеряют потребление реактивной электрической энергии в трехфазной сети?

Реактивную электрическую энергию учитывают при помощи счетчиков реактивной энергии. Промышленность выпускает несколько таких счетчиков, например СРЧ-И673М, СРЧ-И689 и др.

Счетчик СРЧ-И673М относится к трехфазным трансформаторным универсальным приборам для учета реактивной энергии трех-

фазного тока частотой 50 Гц. Класс его точности 2. Включают СРЧ непосредственно на напряжение 127, 220, 380 В и ток 5 и 10 А; через трансформатор тока на первичный ток 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000 А, вторичный ток 5 А и напряжение 127, 220, 380 В; через трансформатор тока и трансформатор напряжения на первичный ток 5, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000 А, вторичный 5 А, первичное напряжение 380, 500, 660, 3000, 6000, 10 000, 35 000 В, вторичное напряжение 100 В.

На рисунке 15.4, а показана схема включения счетчика СРЧ-673М непосредственно в трех- и четырехпроводную сеть. Из схемы

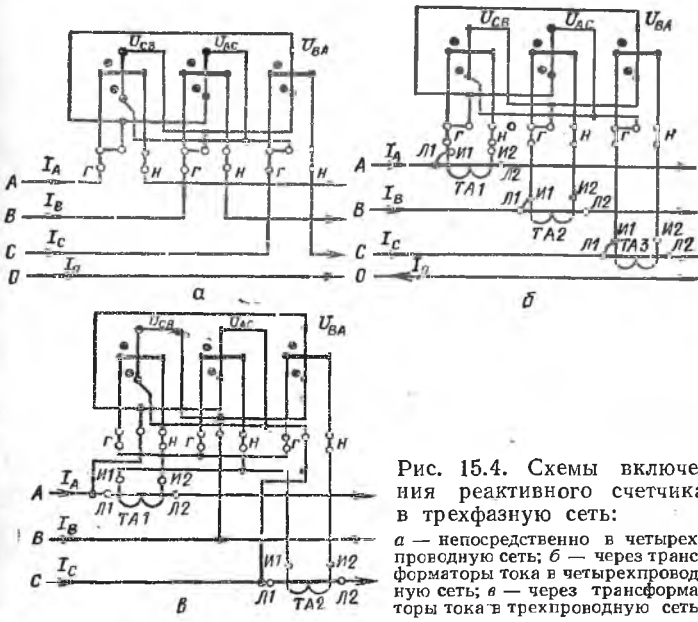


Рис. 15.4. Схемы включения реактивного счетчика в трехфазную сеть:
 а — непосредственно в четырехпроводную сеть; б — через трансформаторы тока в четырехпроводную сеть; в — через трансформаторы тока в трехпроводную сеть.

видно, что токовые катушки счетчика включены на линейные токи, а катушки напряжения — на «чужие» фазы.

При определении потребляемой реактивной электрической энергии в цепях с большим током счетчики включают через измерительные трансформаторы тока. При включении счетчика СРЧ-И673М в сеть следует обращать внимание на то, какая система используется при передаче электрической энергии — трех- или четырехпроводная. Схемы включения счетчика в этом случае разные.

При четырехпроводной сети используют три трансформатора тока, во вторичные цепи которых включают соответствующие токовые катушки счетчика, а катушки напряжения включают на «чужие» фазы (рис. 15.4, б). В трехпроводной сети используют всего два трансформатора тока, во вторичные обмотки которых включены токовые катушки, например фазы А и С (рис. 15.4, в), а ток, проходя-

щей по катушке фазы B , равен векторной сумме токов I_A и I_C . Катушки напряжения включают и здесь на «чужие» фазы.

Для включения счетчика реактивной электроэнергии в высоковольтную сеть, кроме измерительных трансформаторов тока, применяют еще два трансформатора напряжения. Схемы включения реактивных счетчиков при четырех- и трехпроводной цепи отличаются числом используемых трансформаторов тока. Катушки напряжения включают на «чужие» фазы, но только во вторичную цепь трансформаторов напряжения, включенную по схеме открытого треугольника.

Глава 16. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

16.1. Какие методы применяют на практике для измерения активных сопротивлений постоянному току!

Активные сопротивления твердых проводников обычно измеряют на постоянном токе, а сопротивления проводников, имеющих большую влажность (жидкости, заземление), лучше измерять на переменном токе.

Методы измерения сопротивления можно разделить на три группы: амперметра и вольтметра, мостовой и резонансный. Для получения более точных результатов каждый из этих методов можно совместить с методом замещения.

Широкое применение нашел на практике метод амперметра и вольтметра вследствие того, что по измеряемому сопротивлению можно пропускать такой же ток, что и в рабочем режиме. Это важно при измерении сопротивлений, значение которых зависит от тока. Этот метод прост, но точность его невелика (относительная погрешность порядка 1...5 %). На этом методе основано действие омметров — приборов для измерения активных сопротивлений.

Среди всех методов, применяемых для измерения сопротивлений, наибольшее распространение получил мостовой. На нем основан принцип действия цифровых приборов, предназначенных для измерения активного сопротивления.

Резонансный метод измерения активного сопротивления наибольшее распространение получил в радиотехнике при измерении сопротивлений на заданной частоте и здесь не рассматривается.

Большие сопротивления (свыше 10^6 Ом) обычно измеряют специальными приборами — мегомметрами, а очень малые (порядка сотых и тысячных долей ома) — при помощи специальных двойных мостов (от 10^{-4} до 10^2). Сопротивления в диапазоне от 10 до 10^8 Ом можно также измерять одинарным мостом. Точность измерения двойных мостов выше, чем одинарных.

16.2. Как измерить активное сопротивление при помощи амперметра и вольтметра в цепи постоянного тока!

Поскольку в активном сопротивлении между напряжением и током имеется прямая зависимость ($U=IR$), то для определения сопротивления в сети R_x достаточно иметь два прибора: амперметр

Для измерения тока и вольтметр для измерения напряжения. На первый взгляд это очень простой способ измерения, однако практически это не всегда простая задача, особенно, если используется вольтметр с не очень большим внутренним сопротивлением. Дело в том, что если вольтметр включить до амперметра (рис. 14.1, а), то амперметр будет измерять ток I , действительно протекающий по измеряемому сопротивлению, а вольтметр покажет сумму падения напряжения в измеряемом сопротивлении R_x (на рисунке 14.1, а обозначено R), равного $U_x = IR_x$, и падения напряжения в сопротивлении амперметра R_A , равного $U_A = IR_A$. Поэтому, если разделить показание вольтметра $U_V = U_x + U_A$ на показание амперметра $I_A = I$, то получим

$$R_{\text{изм}} = \frac{U_V}{I_A} = R_x + R_A.$$

Из формулы видно, что результат измерения отличается от действительного сопротивления R_x на значение сопротивления амперметра R_A .

Следовательно, относительная ошибка измерения для данной схемы включения составляет

$$\delta = (R_A/R_x) 100,$$

то есть относительная погрешность измерения тем меньше, чем больше измеряемое сопротивление. При измерении малых сопротивлений, соизмеримых с сопротивлением самого амперметра, погрешность измерения может достигать 100 % и более.

Таким образом, если требуется измерить большие сопротивления, то надо применять схему а (рис. 14.1), то есть вольтметр включать до амперметра.

При измерении по второй схеме (рис. 14.1, б), то есть при включении вольтметра после амперметра, показания вольтметра равны напряжению на измеряемом сопротивлении $U_V = U_x$, а показания амперметра равны сумме значений тока, измеряемого и проходящего через вольтметр:

$$I_A = I_x + I_V = U_x/R_x + U_x/R_V = U_x (R_V + R_x)/(R_V R_x).$$

Тогда измеренное сопротивление определяется по формуле

$$R_{\text{изм}} = U_V/I_A = R_V R_x/(R_V + R_x).$$

Относительная погрешность измерения в этом случае

$$\delta = (\Delta R/R) 100 = - [R_x/(R_V + R_x)] 100,$$

то есть, чем меньше измеряемое сопротивление, тем меньше относительная ошибка измерения. Таким образом, если требуется измерить малые сопротивления, то надо вольтметр включать после амперметра.

Из изложенного выше видно, что при измерении сопротивления при помощи амперметра и вольтметра можно, имея очень точные приборы (амперметр и вольтметр), получить очень большую погрешность измерения, если неправильно выбрать схему включения приборов. Эту погрешность называют погрешностью метода измерений.

16.3. Как устроен и работает омметр!

Омметр — прибор магнитоэлектрической системы, последовательно или параллельно с которым включается измеряемое сопротивление.

Обычно приборы, предназначенные для измерения сопротивления до 1 кОм, имеют параллельную схему включения и прямую шкалу. Приборы для измерения сопротивления порядка нескольких тысяч оммов выполняются по последовательной схеме и имеют обрат-

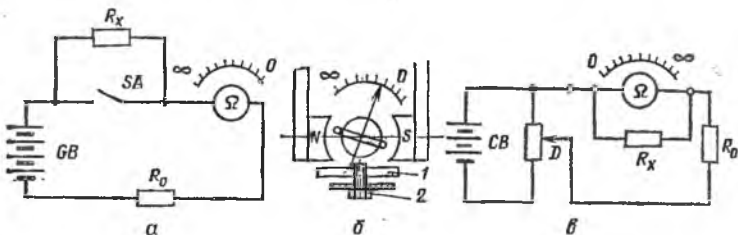


Рис. 16.1. Схемы омметров для измерения сопротивлений (*а* — последовательная; *в* — параллельная) и устройство магнитного шунта (*б*).

ную шкалу. В приборе с параллельной схемой включения собранная измерительная цепь питается от источника постоянного тока (рис. 16.1, *а*).

При подключении питания в цепи проходит ток

$$I = \frac{E}{R_x + R_o + r_o + r_{\Pi}}$$

где E — ЭДС источника питания; R_o — ограничивающее сопротивление; r_o — внутреннее сопротивление источника питания; r_{Π} — внутреннее сопротивление прибора; R_x — измеряемое сопротивление.

Поскольку сопротивления R_o , r_o , r_{Π} постоянны, то значение тока в сети зависит только от измеряемого сопротивления R_x , следовательно, шкалу прибора можно отградуировать в единицах измеряемого сопротивления. Сказанное справедливо в том случае, если ЭДС источника постоянна. Практически ЭДС источника питания — величина непостоянная и с течением времени уменьшается. Поэтому при измерении одного и того же сопротивления с течением времени уменьшаются ток в цепи и угол отклонения стрелки прибора α , следовательно, появляется отрицательная погрешность измерения. Чтобы этого избежать, в приборах устанавливают специальный магнитный шунт, при помощи которого можно изменять чувствительность прибора, изменяя магнитную индукцию в зазоре.

Магнитный шунт состоит из ферромагнитной пластинки 1 , которую можно приблизить к полюсным наконечникам или удалить от них при помощи регулировочного винта 2 (рис. 16.1, *б*), тем самым уменьшив магнитную индукцию или увеличив.

Работают омметром следующим образом. Перед измерением нажимают кнопку SA (рис. 16.1, *а*), шунтирующую измеряемое сопротивление, и при помощи магнитного шунта устанавливают стрел-

ку на контрольную отметку. Прибор готов к работе. Отпускная кнопка, включают в сеть измеряемое сопротивление R_x . Стрелка прибора покажет значение измеряемого сопротивления.

Особенность омметра с последовательной схемой в том, что у этого прибора шкала обратная, то есть нулевая отметка находится с правой стороны шкалы, а отметка максимального значения сопротивления — с левой. Это объясняется тем, что при подключении прибора при измерении большого сопротивления через рамку прибора идет слабый ток.

Омметры, у которых измеряемое сопротивление включается параллельно прибору, имеют прямую шкалу (рис. 16.1, в). Чем меньше измеряемое сопротивление, тем большая часть тока проходит через рамку прибора.

Значение сопротивления R_0 в этом случае, как правило, много больше измеряемого сопротивления R_x и сопротивления рамки прибора r_n , а поэтому значение рабочего тока I мало зависит от измеряемого сопротивления R_x .

Для установки стрелки прибора на нулевую отметку (на особую отметку) чаще применяют не магнитный шунт, а потенциометр. При этом сопротивление R_x закорачивают, и при помощи движка D потенциометра устанавливают нуль. Прибор готов к измерению.

Из множества выпускаемых промышленностью омметров наиболее простой омметр М371, а один из самых сложных Р380. Омметр М371 относится к двух- и трехпредельным приборам для быстрых измерений сопротивлений. Класс точности 1,5. Прибор изготавливают в трех модификациях с пределами измерений: 100; 1000 и 10 000 Ом; 10 и 100 Ом; 100 кОм и 10 МОм. Напряжение питания соответственно 1,3; 6 и 120 В. Потребляемый ток 70, 23 и 0,56 мА.

Омметр Р380 — цифровой прибор для автоматического измерения сопротивлений на постоянном токе с визуальным однострочечным отсчетом с наименованием единиц измерений (Ом, кОм, МОм) и плавающей запятой. Есть в приборе выход на цифropечатающее устройство. Класс точности 0,1, пределы измерений: 10. . .99, 999 Ом. Класс точности 0,05, пределы измерений: 100. . .999, 99 кОм. Класс точности 0,2, пределы измерений 1. . .9,999 МОм. Напряжение 220 В; 50 Гц.

16.4. Как устроен и работает мегомметр!

В качестве прибора для измерения очень больших значений сопротивлений применяют магнитоэлектрический логотрический измерительный механизм (п. 2.5) — мегомметр.

В мегомметре имеется источник питания. Это чаще всего генератор постоянного тока с параллельным возбуждением и ручным приводом. Применение генератора с ручным приводом возможно потому, что угол отклонения стрелки прибора зависит только от отношения токов в рамках и практически не зависит от подаваемого напряжения, то есть можно напряжение питания не стабилизировать. Последовательно с одной из рамок включают образцовое сопротивление, а последовательно с другой подвижной рамкой — измеряемое.

Шкала мегомметра охватывает широкий диапазон значений сопротивления (от 0 до ∞). Прибор часто выполняют двухпредельным. Например, мегомметр М1101 имеет два предела: от 0 до 500

МОм и от 0 до 2000 кОм. Переход от одного предела измерений к другому осуществляется при помощи переключателя. На корпусе прибора два положения переключателя отмечены надписями МΩ и кΩ.

Перед измерением обязательно убеждаются в том, что испытываемые электрические цепи не находятся под напряжением. Для проверки исправности прибора вращают ручку генератора при разомкнутых зажимах и следят за тем, чтобы стрелка установилась на отметку «∞» шкалы, когда переключатель находится в положении МΩ, или на отметку «нуль», когда переключатель находится в положении кΩ. Чтобы исключить влияние поверхностных токов утечки, возникающих под влиянием влажности или загрязненности участка разделки жилы кабеля и уменьшающих показание прибора, на изоляцию жилы накладывают виток голой проволоки (бандаж).

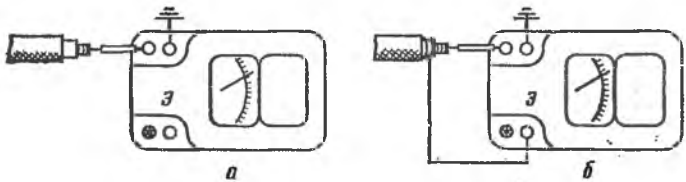


Рис. 16.2. Схемы включения мегомметра для измерения сопротивления изоляции:

а — без защиты от утечки; *б* — с защитой от утечки.

и присоединяют его к экранированному зажиму Э. Схемы включения мегомметра показаны на рисунке 16.2.

Промышленность выпускает мегомметры с номинальными напряжениями 100, 500 и 1000 В и пределами измерения сопротивления изоляции от 0 до 1000 МОм типов М1101М, М1102/1, М503М, МС-0,5 и др.

Мегомметр М1101М — переносной двухпределный прибор для измерения сопротивления изоляции электроцепей без напряжения. Класс точности 1,0. Номинальное напряжение 100, 500, 1000 В. Пределы измерений рабочей части шкалы соответственно: 0,01...2,0; 0,05...100 и 0,2...220 МОм. Конечное значение шкалы 500 МОм. Номинальная частота вращения генератора 120 мин⁻¹.

Мегомметр М1102/1 — переносной прибор, предназначенный для измерения больших сопротивлений. Основная погрешность ±10%. Конечное значение шкалы 500 МОм. Рабочий диапазон измерений 0,2...200 МОм.

Мегомметр М503М относится к лабораторным приборам. Основная погрешность ±1,0. Номинальное напряжение на зажимах 500 В. Рабочий диапазон измерений сопротивлений 0,2...200 МОм.

Мегомметр МС-0,5 имеет выходное напряжение 2500 В и три предела измерений: 1...1000; 0,1...100; 0,01...10 МОм.

Мегомметры типа М4100/1...М4100/5 имеют номинальное выходное напряжение 100, 250, 500, 1000 и 2500 В и соответствующие им пределы измерений: 0,01...20; 0,02...50; 0,05...100; 0,2...200 и 0,5...1000 МОм. В данных приборах вместо генератора по-

стоянного тока применяется генератор переменного тока с выпрямителем.

Мегомметр Ф4100 имеет внешнее питание от сети 127 или 220 В, 50 Гц или от источника постоянного тока напряжением 12 В.

16.5. Как измерить сопротивление при помощи мостов?

Для измерения средних сопротивлений до 1 МОм очень часто используют одинарные мосты постоянного тока (см. п. 8.1). Прежде чем выбрать измерительный мост и режим его работы, устанавливают приблизительное значение измеряемого сопротивления.

На заводской табличке и на лицевой панели измерительного моста обычно указаны схема и рекомендации к выбору целесообразного режима работы в зависимости от диапазона измеряемого напряжения.

При выборе моста следует иметь в виду, что магазинные мосты (см. п. 8.1) применяют в лабораторных условиях, а реохордные используют как переносные. Штепсельные мосты более точны, чем рычажные.

Измерительные мосты высоких классов точности (0,02 и 0,05) комплектуются выносным гальванометром и получают питание от внешнего источника питания напряжением 3 В.

Мосты более низких классов точности имеют встроенные гальванометры и источник питания. Рабочий ток в измерительных мостах определяется допустимой мощностью рассеяния в резисторах.

Если выбран реохордный мост, то плечо сравнения нужно выбирать таким, чтобы уравнивание моста приходилось на середину реохорда. В этом случае чувствительность моста и точность результата будут наибольшими.

Если выбран магазинный мост, то для повышения точности измерений отношение плеч следует выбирать таким, чтобы при уравнивании его были использованы резисторы всех декад плеча сравнения.

Если предварительно трудно определить ориентировочное числовое значение измеряемого сопротивления, то нужное отношение сопротивлений плеч моста подбирают опытным путем. Для этого при произвольном отношении сопротивлений и при двух крайних значениях сопротивления плеча сравнения кратковременно включают гальванометр (рис. 8.1). Если при этом указатель гальванометра отклоняется попеременно в противоположные стороны, значит, измерение возможно. А если указатель гальванометра отклоняется в одну сторону, то последовательными попытками подбирают нужное отношение сопротивлений плеч.

Предварительное уравнивание моста выполняют обычно при последовательно включенном в цепь гальванометра сопротивлении (загружение). Окончательно уравнивают мост при нажатой кнопке SA2 («Точно»), то есть при выключенном ограничительном резисторе.

Самый простой и удобный для работы мост Р333. Этот одинарный мост позволяет измерять сопротивления в диапазоне от $5 \cdot 10^{-3}$ до $999,9 \cdot 10^3$ Ом, определять места повреждения кабеля петлей Варлея или петлей Муррея, измерять несимметрию проводов, может быть использован в качестве магазина сопротивлений. Класс точности 0,5. Имеет встроенный нуль-индикатор и источник питания.

Мост Р316 аналогичен по конструкции мосту Р333, имеет диапазон измерений от 0,01 до 10^5 Ом и класс точности 0,2. Отличается тем, что питание его осуществляется от сети напряжением 127 или 220 В с частотой 50 Гц через два встроенных выпрямителя.

Одинарно-двойной мост Р329 предназначен для точных измерений сопротивлений в диапазоне от 10^{-6} до 10^6 Ом. Двойной мост в пределах измерений от 10^{-6} до 10^{-5} Ом имеет класс точности 1,5, в диапазонах от 10^{-5} до 10^{-4} Ом — 0,5, от 10^{-4} до 10^{-3} Ом — 0,1; от 10^{-3} до 100 Ом — 0,05. Мост одинарный в пределах измерений от 50 до 100 000 Ом имеет класс точности 0,05 и при измерении сопротивлений от 100 000 до 1 111 100 Ом — 0,5.

Промышленность выпускает ряд цифровых омметров для измерения сопротивлений, например Щ34, Р380, Р382 и др. Омметр

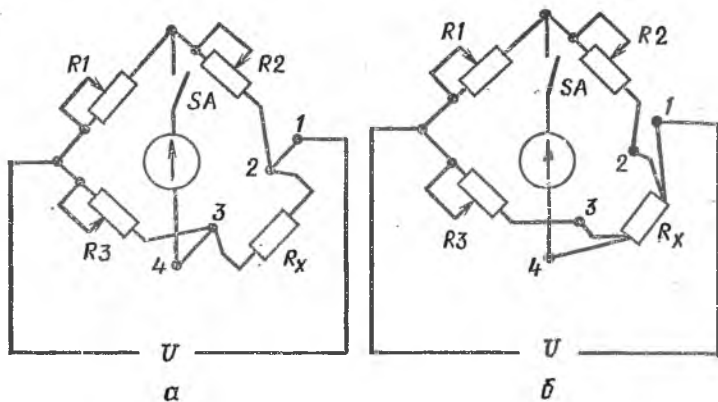


Рис. 16.3. Схемы подключения измеряемого сопротивления в цепь одинарного моста:

а — большое сопротивление; *б* — малое сопротивление.

Щ34 предназначен для измерения сопротивлений постоянного тока в диапазоне от 10^{-3} до 10^9 Ом. Весь диапазон разбит на восемь поддиапазонов, причем выбор и переключение поддиапазонов автоматические. Основная погрешность измерений лежит в пределах $\pm 0,02$ на поддиапазонах от 10^3 до 10^5 Ом и до $\pm 0,1$ на поддиапазонах от 10^7 до 10^9 Ом. Время измерения 1 с.

При измерении при помощи одинарных мостов малых сопротивлений (менее 10 Ом), соизмеримых с сопротивлением соединительных проводов, возникает большая погрешность. Для ее уменьшения применяют одинарные четырехзажимные мосты (рис. 16.3, *а*). При подключении малого измеряемого сопротивления применяют четыре соединительных провода (рис. 16.3, *б*) вместо обычных двух (рис. 16.3, *а*). Один из соединительных проводов включают в цепь гальванометра, второй — в цепь источника энергии, третий — последовательно с резистором сравнения R_2 , а четвертый — последовательно с резистором R_3 . Таким образом получается, что последовательно с измеряемым сопротивлением не включен ни один из четырех соединительных проводов. Мосты, выполненные по такой

схеме, могут измерять с достаточной точностью сопротивления до 0,005 Ом, например мост Р333.

При необходимости измерения очень малых сопротивлений (меньше 1 Ом) применяют двойные мосты. Их особенность заключается в том, что измеряемое сопротивление R_x включают последовательно с образцовым резистором R_0 и через них пропускают рабочий ток. При этом происходит падение напряжения в образцовом резисторе и в измеряемом сопротивлении (рис. 8.3). Измеряемое сопротивление включают в плечо моста R_x , устанавливают рабочий ток I_p (допустимое значение тока ограничено допустимым значением тока для образцового резистора и обычно указано на приборе). Путем изменения сопротивлений резисторов R_2 и R_3 (они должны быть одинаковыми) добиваются минимального отклонения стрелки гальванометра при произвольно установленном значении сопротивления R_1 . После этого находят такое положение движка D , при котором ток в гальванометре равен нулю при нажатой кнопке «Точно».

При получении равновесия моста можно снимать показания прибора.

Каждое измерение на двойном мосте делают обязательно дважды, изменяя направление рабочего тока специальным переключателем направления тока, чтобы исключить погрешность, возникающую из-за появления термо-ЭДС в схеме моста. Часто двойные мосты изготавливают комбинированными, то есть при измерении больших сопротивлений они работают как одинарные, а при измерении малых — как двойные. Например, одинарно-двойной мост Р329 позволяет измерять сопротивления от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^6$ Ом, то есть практически, имея такой мост, можно измерять любые сопротивления.

16.6. Как измерить сопротивление при помощи одного вольтметра!

Если не требуется большой точности при измерении сопротивления, то можно для этой цели воспользоваться вольтметром. Для этого надо знать его внутреннее сопротивление R_V , значение которого обычно указано на приборе. Если внутреннее сопротивление вольтметра неизвестно, то его надо измерить при помощи моста или омметра, запомнить его или записать на приборе.

Для того чтобы измерить сопротивление вольтметром, его включают последовательно с измеряемым сопротивлением R_x , которое закорачивают при помощи кнопки SB (рис. 16.4). При нажатой кнопке SB определяют показание вольтметра, то есть получают напряжение сети U_c , после чего размыкают кнопку и фиксируют показания вольтметра U_V . Можно определить ток в сети $I = U_V / R_V$. Затем находят падение напряжения на R_x , равное

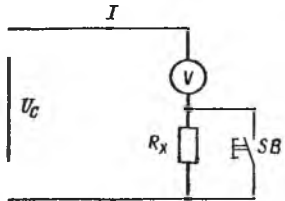


Рис. 16.4. Схема измерения сопротивления одним вольтметром.

$$IR_x = (U_V / R_V) R_x = U_c - U_V.$$

Следовательно, зная показания вольтметра при нажатой кнопке U_c и при разомкнутой U_V и его внутреннее сопротивление R_V , можно определить измеряемое сопротивление R_x по формуле

$$R_x = (U_c / U_V - 1) R_V.$$

16.7. Как измерить сопротивление заземления!

При выполнении заземления часто необходимо определять значение его сопротивления. Для этой цели служат специальные приборы типов МС-0,8, М-416, М1103 и др. Принцип их работы ста-

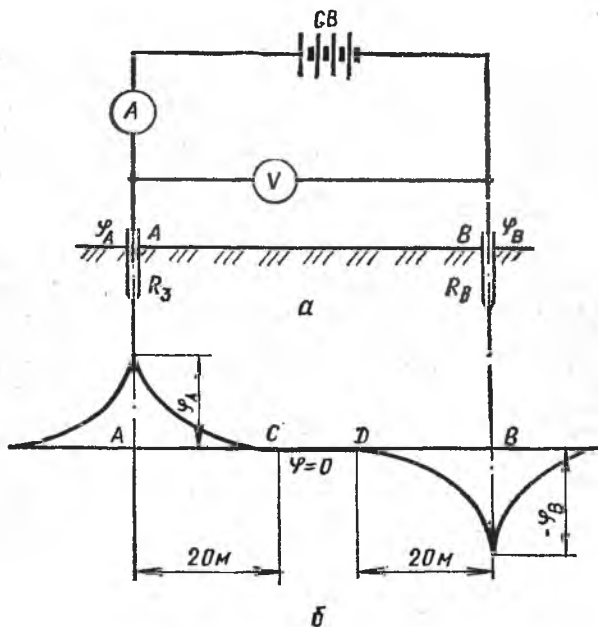


Рис. 16.5. Схема подключения амперметра и вольтметра для измерения сопротивления заземления (а) и распределение электрических потенциалов по поверхности земли (б).

нет понятен, если рассмотреть более простой способ определения сопротивления при помощи амперметра и вольтметра. Так, если собрать цепь (рис. 16.5, а): источник питания, амперметр, главный ваземлитель А, земля, вспомогательный заземлитель В или электрод, источник, то, измерив ток и напряжение в сети, получим $U_V / I_A = R_з + R_B$. Если электроды одинаковые, то

$$R_з = U_V / 2I_A \text{ или } R_з = (\varphi_A - \varphi_B) / 2I_A = E / 2I_A,$$

где E — ЭДС источника питания, В; I_A — ток, проходящий через электроды заземления, А; φ_A и φ_B — потенциалы точек А и В, В.

Из рисунка 16.5, б следует, что на расстоянии 20 м от заземления потенциал земли практически равен нулю. Следовательно, если в этом месте установить еще один вспомогательный электрод (зонд) и измерить электростатическим вольтметром напряжение между точкой А и зондом С (рис. 16.6, а), то значение сопротивления R_3 определится по формуле $R_3 = U_V / I$.

Хорошо представляя эту схему, рассмотрим принципиальную схему измерителя сопротивления заземления МС-0,8 (рис. 16.6, б). Из нее видно, что один конец источника питания подключен к одной

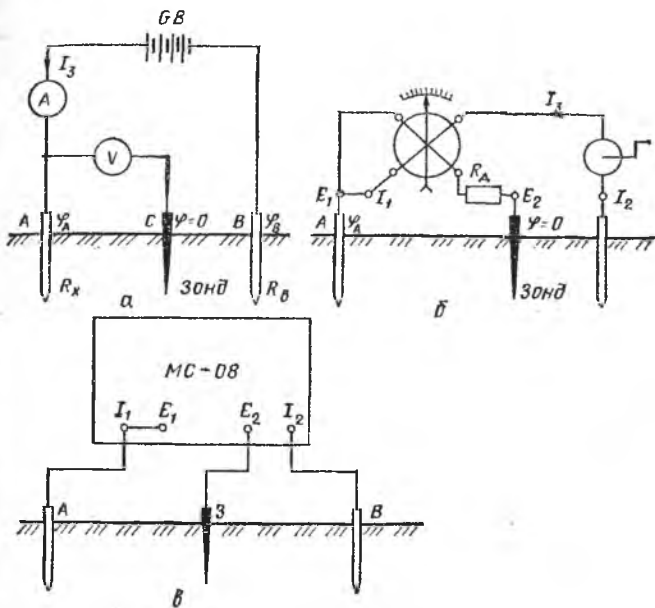


Рис. 16.6. Схемы включения приборов для измерения сопротивлений заземления:

а — амперметром и вольтметром; б — логометром; в — прибором МС-0,8.

из катушек логометра и далее к главному электроду (заземлителю). Ток в этой катушке пропорционален или равен току заземления. От главного заземлителя собрана цепь второй катушки логометра, последовательно с которой включены добавочное сопротивление R_d и зонд. Ток в этой катушке пропорционален напряжению между главным электродом и зондом. При таком включении катушек угол отклонения прибора пропорционален измеряемому сопротивлению заземлителя, и шкалу можно отградуировать в единицах измеряемого сопротивления. На рисунке 16.6, в показана схема подключения прибора типа МС-0,8. На панели прибора имеются клеммы I_1 , E_1 , E_2 и I_2 .

При измерении сопротивления заземления широкое распространение получили приборы М416. Для подключения измеряемого сопротивления, вспомогательного заземления и зонда на приборе расположены четыре зажима, обозначенные цифрами 1, 2, 3, 4.

Для грубых измерений сопротивления заземления и больших сопротивлений (больше 1 Ом) зажимы 1 и 2 соединяют перемычкой и прибор подключают к измеряемому объекту по трехзажимной схеме (рис. 16.7, а).

При точных измерениях снимают перемычку с зажимов 1 и 2 и прибор подключают по четырехзажимной схеме (рис. 16.7, б). Это позволяет исключить погрешность, вносимую сопротивлением соединительных проводов и контактов.

Рассмотрим технические данные некоторых приборов для измерения сопротивления заземления, например М416 и М1103.

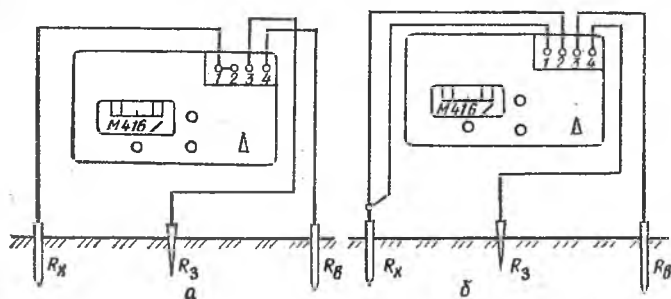


Рис. 16.7. Схемы включения прибора М416 при измерении больших (а) и малых (б) сопротивлений заземления.

Измеритель сопротивления заземления типа М416 имеет четыре предела измерений: 0,1...10; 0,5...50; 2...200; 10...1000 Ом. Основная погрешность $\pm 5\%$ измеряемой величины, питание от сухих элементов 4,5 В, потребляемый ток 90 мА.

Прибор М1103 относится к искробезопасным измерителям сопротивлений заземления. Пределы измерений сопротивлений от 0,5 до 50 Ом со шкалами от 1 до 10 Ом и от 0,5 до 50 Ом. Основная погрешность на первом поддиапазоне $\pm 5\%$, на втором — $\pm 10\%$ измеряемой величины.

Если возникает необходимость в определении сопротивления петли «фаза — нуль», то используют прибор типа М417. Сопротивление петли «фаза — нуль» измеряют без отключения питающего источника тока на электроустановках напряжением 380 В с целью проверки наличия условий, обеспечивающих безопасность работы персонала. Диапазон показаний 0,1...3 Ом.

Глава 17. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ, ИНДУКТИВНОСТИ И ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ

17.1. Какие параметры конденсаторов и катушек индуктивности можно измерить электроизмерительным прибором!

Известно, что чисто емкостных и индуктивных приемников практически не существует. Любой конденсатор, помимо емкости, обязательно имеет еще и активное сопротивление. Поэтому приняты

две схемы замещения реальной катушки индуктивности: последовательная и параллельная.

При последовательной схеме замещения конденсатор изображают в виде последовательно включенных емкости C и активного сопротивления R (рис. 17.1, а). Это значит, что при прохождении через конденсатор тока I в нем будет два падения напряжения $U_c = IX_c$ и $U_a = IR$, а общее напряжение на его зажимах $U = U_c + U_a$. Из векторной диаграммы (рис. 17.1, б) видно, что ток, потребляемый конденсатором, опережает напряжение не на 90° , а на угол φ , который меньше 90° на угол δ , последний называют углом диэлектрических потерь. Конденсаторы принято характеризовать двумя

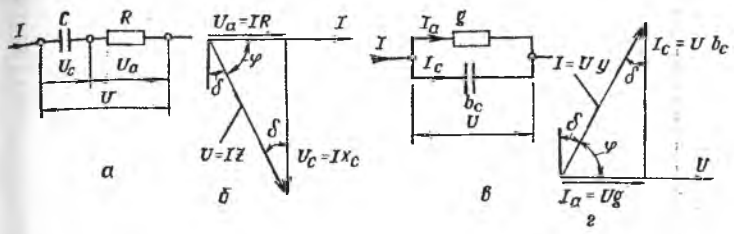


Рис. 17.1. Эквивалентные схемы замещения и векторные диаграммы конденсаторов:

а к б — при последовательной, в и г — при параллельной схемах замещения.

параметрами: емкостью C и тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$. Из векторной диаграммы видно, что

$$\operatorname{tg} \delta = U_a / U_c = IR / (IX_c) = R\omega C. \quad (17.1)$$

При параллельной схеме замещения конденсатор изображают в виде двух параллельно включенных проводимостей: активной g и емкостной b_c (рис. 17.1, в). Следовательно, ток, проходящий через конденсатор, равен геометрической сумме активного тока I_a и емкостного I_c . Из векторной диаграммы (рис. 17.1, г) видно, что и здесь ток опережает напряжение не на 90° , а на угол $(90^\circ - \delta)$, причем

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I = Ug / (Ub_c) = \frac{1}{(R\omega C)}. \quad (17.2)$$

Реальную катушку индуктивности тоже можно представить в виде двух эквивалентных схем: последовательной и параллельной. При последовательной схеме замещения катушку изображают в виде последовательно включенных активного сопротивления R и индуктивности L (рис. 17.2, а). Из векторной диаграммы токов и напряжений (рис. 17.2, б) видно, что при последовательной схеме замещения ток, потребляемый индуктивной катушкой, отстает от напряжения на некоторый угол φ . Поэтому при измерении параметров катушки индуктивности в ней обычно выделяют и измеряют значение индуктивности L и сопротивления R или чаще добротность Q , под которой понимают отношение индуктивного сопротивления катушки к активному:

$$Q = \omega L / R. \quad (17.3)$$

При параллельной схеме замещения (рис. 17.2, в) ток, потребляемый индуктивной катушкой, представляет собой геометрическую сумму активного I_a и индуктивного I_L токов. Из векторной диаграммы (рис. 17.2, г) видно, что ток, потребляемый катушкой, отстает от напряжения на некоторый угол φ , а добротность составляет

$$Q = b_L/g. \quad (17.4)$$

Таким образом, для измерения параметров конденсаторов и катушек индуктивностей необходимы методы и аппаратура, позволяющие отдельно измерять активную и реактивную составляющие

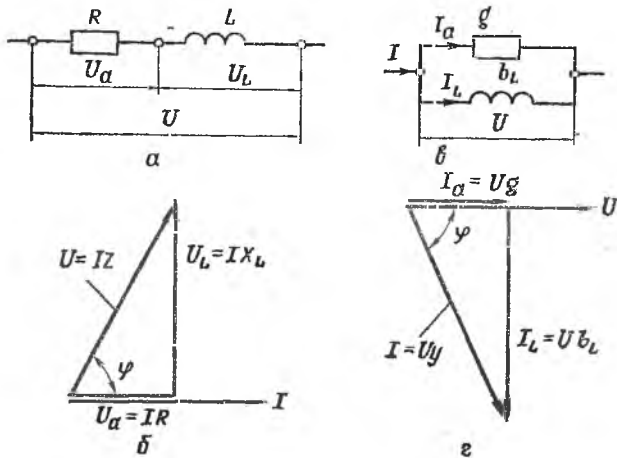


Рис. 17.2. Эквивалентная схема замещения и векторные диаграммы катушек индуктивности:

а и б — при последовательной; в и г — при параллельной схемах замещения.

комплексного сопротивления. Наиболее часто для этих целей применяют мосты переменного тока. Измерить емкость можно и при помощи фарадометра или баллистического гальванометра.

17.2. Как измерить индуктивность и добротность при помощи моста переменного тока?

Если в два плеча моста включить активные сопротивления R_1 и R_2 , а в третье плечо ввести образцовую индуктивность L_0 , то в момент уравнивания (при данной чувствительности моста стрелка гальванометра имеет минимальное отклонение, то есть $I_x = 0$) справедливо равенство

$$j\omega L_x R_2 = j\omega L_0 R_1, \text{ откуда } L_x = L_0 R_1 / R_2.$$

Если индуктивность измеряется у реальной катушки, в которой, кроме L_x , есть еще и активное сопротивление катушки R_x , то мост можно сбалансировать, если в прилежащее плечо, кроме L_0 , будет включено образцовое активное сопротивление R_0 (рис. 17.3, а).

Тогда уравнение балансировки будет $(R_x + j\omega L_x) R_2 = (R_0 + j\omega L_0) R_1$, после преобразований $R_x R_2 + j\omega R_2 L_x = R_0 R_1 + j\omega L_0 R_1$, отсюда можно получить, что

$$R_x = R_0 R_1 / R_2 \text{ и } L_x = L_0 R_1 / R_2.$$

Это значит, что для полного уравновешивания моста необходимо изменять еще и сопротивление R_0 .

Такие мосты позволяют измерять не только индуктивность катушек, но и их добротность.

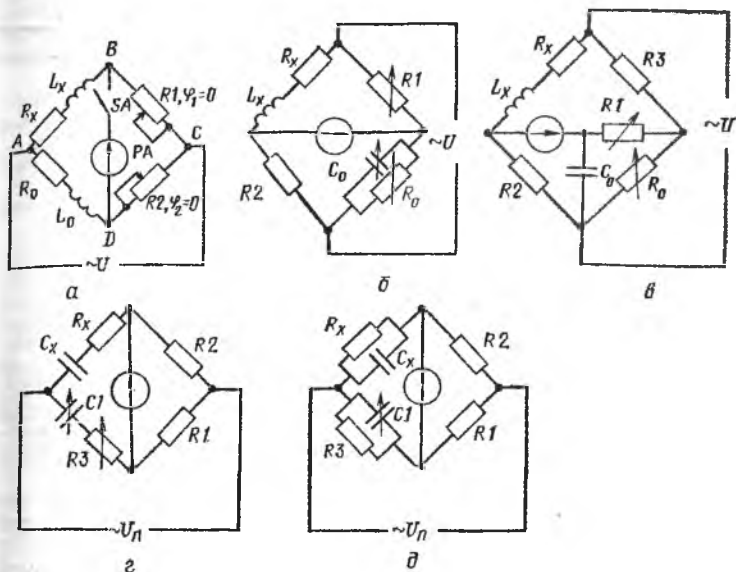


Рис. 17.3. Схемы мостов переменного тока для измерения: а, б, в — индуктивности; г, д — емкости.

При изготовлении мостов переменного тока для измерения индуктивности и добротности в качестве образцовой величины для сравнения можно применять образцовую емкость, которую можно изготовить более точно, чем образцовую индуктивность. При комплектации плеч моста берут два сопротивления, например $Z_1 = R_1$ и $Z_2 = R_2$; тогда из второго условия балансировки моста переменного тока получают $\varphi_x + \varphi_2 = 0$ или $\varphi_2 = -\varphi_1$. Отсюда следует, что в противолежащее плечо необходимо ввести сопротивление с углом сдвига фаз, равным $-\varphi_x$, то есть вместо индуктивности брать емкость. Таким образом, если индуктивные катушки имеют большие потери, то есть, кроме индуктивности, обладают еще определенным активным сопротивлением, то для полного уравновешивания моста в противолежащее плечо, кроме образцовой емкости, нужно включить еще добавочное активное сопротивление R_0 (рис. 17.3, б). Тогда из условия равновесия моста получим

$$R_x = R_1 R_2 / R_0 \text{ и } L_x = R_1 R_2 C_0.$$

Значение добротности катушки определяется выражением

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C_0 R_0.$$

Такой мост уравнивается регулировкой R_1 и R_0 , причем R_1 пропорционально индуктивности, а R_0 — добротности измеряемой катушки. Эта схема хорошо работает, если добротность катушки значительно больше единицы, так как при низких добротностях процесс уравнивания либо затруднен, либо практически невозможен. Поэтому, если добротность у катушек индуктивности низкая, то для измерения индуктивности и добротности используют шести-плечий мост (рис. 17.3, в).

Промышленность выпускает специальные приборы для измерения емкости и $\text{tg } \delta$. Мост P589 рассчитан на измерение емкости и тангенса угла потерь в следующих шести поддиапазонах: 0,01...99,999 пФ — основная погрешность $\pm 0,1$, напряжение на объекте измерения — 80 В; 100...999,98 пФ, основная погрешность $\pm 0,1\%$, напряжение 24 В; 1,00...9,9998 пФ, $\pm 0,1\%$, 24 В; 10,00...99,998 нФ, 0,1% — 3 В; 0,1...0,99998 мкФ, $\pm 0,1\%$ — 3 В; 1,00...9,9998 мкФ, $\pm 0,20\%$ и напряжение 0,3 В. Переключение поддиапазонов измерения автоматическое. Рабочая частота 1000 Гц. Продолжительность измерения до 2 с. В приборе имеется выход на цифровое печатающее устройство. Питание от сети 220 В, 50 Гц. Конструктивно мост выполнен в виде переносного прибора настольного типа.

Для измерения индуктивности выпускаются аналогичные мосты типа P591. Предел измерений индуктивности от 10 мкГ до 10 Г и $\text{tg } \delta$ от $1 \cdot 10^{-3}$ до 0,9. Прибор имеет шесть поддиапазонов, а именно: 10...99,99 мкГ; 100...999,9 мкГ; 1,0...9,999 мГ; 10...99,99 мГ; 100...999,9 мГ; 1,0...9,999 Г. Класс точности в зависимости от пределов измерений от 0,2 до 0,4.

Мост переменного тока P577 относится к универсальным, так как позволяет измерять емкость, индуктивность, $\text{tg } \delta$, Q и R на постоянном токе. Погрешность измерения $\pm 1,0\%$. Рабочая частота 1000 Гц. Пределы измерений емкости от 1 пФ до 1100 мкФ, индуктивности от 1 мкГ до 110 Г, сопротивления от 0,1 Ом до 11 МОм на постоянном токе и от 1 Ом до 10 кОм на переменном. Питание 220 В, 50 Гц.

Можно отметить универсальный прибор E7-11, который позволяет измерять емкость в пределах от 100 мкФ до 100 пФ, индуктивность от 100 мкГ до 100 Г, сопротивление от 10 Ом до 10 МОм. Кроме того, им можно измерять $\text{tg } \delta$ и добротность Q . Рабочая частота 100 или 1000 Гц.

17.3. Какие косвенные методы измерения индуктивности и взаимной индуктивности можно применять!

Наиболее простой и доступный метод косвенного измерения индуктивности — примененные амперметра, вольтметра и ваттметра. По показаниям амперметра и вольтметра определяют значение полного сопротивления индуктивной катушки

$$Z = U/I.$$

Из формулы, определяющей значение мощности потерь $P = I^2 R_x$, вычисляют активное сопротивление катушки по показаниям ваттметра и амперметра:

$$R_x = P/I^2.$$

Тогда индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R_x^2}.$$

Зная угловую частоту источника питания ω , можно найти значение индуктивности

$$L_x = X_L/\omega = XL/(2\pi f).$$

Взаимную индуктивность между катушками L_1 и L_2 можно определить по схеме, приведенной на рисунке 17.4, а. Для этого, измерив силу тока в первичной цепи I_1 и ЭДС во вторичной E_2

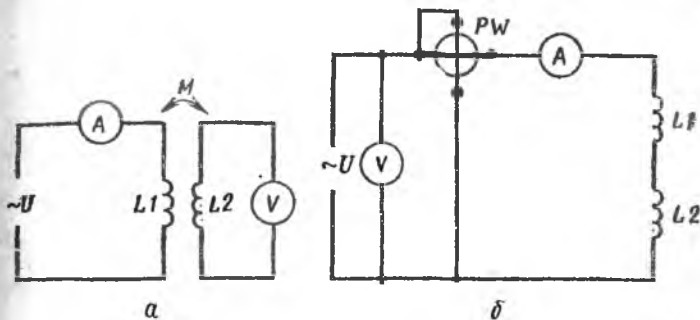


Рис. 17.4. Схема косвенного измерения взаимной индуктивности: а — амперметром и вольтметром; б — ваттметром, амперметром и вольтметром.

при помощи вольтметра с большим внутренним сопротивлением, числовое значение взаимной индуктивности рассчитывают по формуле

$$M_{1,2} = E_2/(\omega I_1) = U_2/(\omega I_1).$$

Можно измерить коэффициент взаимной индуктивности и по схеме на рисунке 17.4, б. Для этого достаточно выполнить два опыта — определить силу тока, напряжение и мощность в цепи при согласном и встречном соединении катушек. Тогда значение взаимной индуктивности можно рассчитать по результатам этих измерений по формуле

$$M_{1,2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)_c^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)_c} - \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)_в^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)_в}}{4\omega},$$

где индексы «с» и «в» введены для показаний приборов при согласном и встречном включении катушек L_1 и L_2 .

Индуктивность можно измерить методом замещения. Для этого собирают цепь, показанную на рисунке 17.5, а. При выключенной

катушке индуктивности L_x (переключатель SA в положении 1) настраивают контур в резонанс с угловой частотой ω и фиксируют емкость $C_{0.1}$, при которой наступает резонанс, после чего включают L_x (переключатель SA ставят в положение 2) и снова при помощи образцовой емкости $C_{0.2}$ добиваются резонанса при неизменной час.

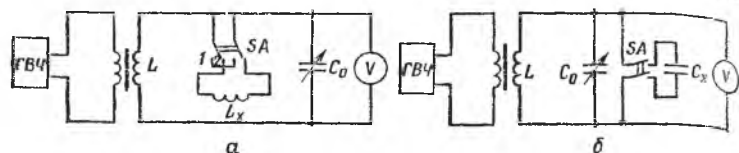


Рис. 17.5. Схемы измерения методом замещения:

а — индуктивности; б — емкости

тоте. Тогда значение измеряемой индуктивности можно определить из выражения

$$L_x = (C_{0.1} - C_{0.2}) / (\omega C_{0.1} C_{0.2}).$$

17.4. Как измерить емкость и угол потерь конденсаторов при помощи мостов!

Допустим, что на рисунке 17.3, з, д показаны моменты, когда мост сбалансирован и ток в нулевом указателе равен нулю, тогда можно записать равенство

$$Z_x Z_1 = Z_2 Z_3. \quad (17.5)$$

Для последовательной схемы замещения конденсатора (рис. 17.3, з)

$$Z_x = R_x + 1/(j\omega C_x); \quad Z_3 = R_3 + 1/(j\omega C_1); \quad Z_2 = R_2; \quad Z_1 = R_1.$$

Подставив эти значения в уравнение (17.5), получим

$$R_x = R_3 R_2 / R_1; \quad C_x = C_1 R_1 / R_2. \quad (17.6)$$

Для параллельной схемы замещения конденсатора (рис. 17.3, д) имеем

$$R_x = R_3 R_2 / R_1; \quad C_x = C_1 R_1 / R_2; \quad \text{tg } \delta = 1/(\omega R_x C_x) = 1/(\omega R_3 C_1). \quad (17.7)$$

Из полученных выражений (17.6, 17.7) видно, что при постоянных сопротивлениях резисторов R_2 и R_1 активное сопротивление конденсатора может быть определено по сопротивлению резистора R_3 , последний должен плавно изменяться при измерении. Значение емкости C_x зависит от значения емкости, включенной в плечо сравнения C_1 . Эта емкость должна быть образцовой и изменяться плавно в процессе измерения.

17.5. Как измерить емкость при помощи фарадометра!

В качестве фарадометра применяют логометры электродинамической системы. Неподвижную катушку логометра соединяют последовательно с конденсатором постоянной емкости C и подключают к напряжению питания U сети переменного тока. Последовательно

с одной из подвижных катушек логометра включают образцовую емкость C_0 , а последовательно с другой — измеряемую емкость C_x . Сопротивления катушек логометра делают настолько малыми по сравнению с сопротивлениями конденсаторов, что ими можно пренебречь и считать, что токи в катушках зависят от емкости, тогда $I_1 = U \omega C_x$; $I_2 = U \omega C_0$, где ω — угловая частота питающей сети.

Известно, что угол отклонения у логометров электродинамической системы зависит от отношения токов, протекающих по катушкам, следовательно,

$$\alpha = F(I_1/I_2) = F(C_x/C_0).$$

Каждому значению емкости C_x при постоянной образцовой емкости C_0 соответствует определенный угол отклонения стрелки логометра. Поэтому шкалу прибора можно отградуировать в единицах емкости. Положительным является здесь то, что изменение значения питающего напряжения не сказывается на результатах измерения.

Промышленность выпускает несколько фарадометров для измерения емкости. Рассмотрим основные технические данные двух из них, а именно Д524М и Д595.

Микрофарадометр типа Д524М — четырехпредельный прибор для измерения емкости конденсаторов с $\operatorname{tg} \delta$ не более 0,03. Его класс точности 1,0, предел измерений: 1; 2; 5 и 10 мкФ.

Микрофарадометр типа Д595 тоже четырехпредельный для измерения емкости конденсаторов с $\operatorname{tg} \delta$ не более 0,03 при рабочем напряжении не ниже 150 В. Класс точности 1,0, пределы измерений 0,1; 0,2; 0,5 и 1 мкФ.

17.6. Как измерить емкость при помощи баллистического гальванометра!

Этот метод основан на измерении баллистическим гальванометром заряда Q , накапливаемого конденсатором C_x во время его включения под напряжение U . Для этого надо собрать схему, показанную на рисунке 17.6. Сначала переключатель SA ставят в положение 1, заряжают конденсатор до напряжения U , измеряемого вольтметром PV с большим внутренним сопротивлением. Затем переключатель SA ставят в положение 2, конденсатор разряжается через баллистический гальванометр, и указатель гальванометра начинает отклоняться до какого-то максимального значения α_{\max} . Это отклонение фиксируется. Зная баллистическую постоянную гальванометра C_6 (из его паспорта), можно определить измеряемую емкость

$$C_x = Q/U = C_6 \alpha_{\max} / U,$$

где C_6 — баллистическая постоянная гальванометра; α_{\max} — максимальное отклонение указателя гальванометра; U — напряжение, измеряемое вольтметром.

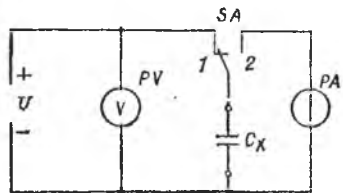


Рис. 17.6. Схема измерения емкости при помощи баллистического гальванометра.

17.7. Как измерить емкость методом замещения!

Если имеется в распоряжении хороший магазин емкости, то с его помощью можно достаточно точно определить емкость конденсатора. Для этой цели также необходимо иметь генератор высокой частоты и индуктивность L . В схеме, показанной на рисунке 17.5, б, после включения генератора изменением образцовой емкости C_0 настраивают контур $L-C_0$ в резонанс и фиксируют значение необходимой емкости $C_{0.1}$. Затем переключателем SA включают в контур измеряемую емкость C_x , резонанс при этом нарушается, но его нужно снова при помощи образцового конденсатора восстановить и зафиксировать новое значение емкости образцового конденсатора в момент резонанса $C_{0.2}$. Тогда измеряемая емкость конденсатора определится по формуле

$$C_x = C_{0.1} - C_{0.2}.$$

Если $C_x > C_0$, то измерение методом замещения выполняют при последовательном соединении конденсаторов C_0 и C_x . В этом случае емкость неизвестного конденсатора определяют по отношению

$$C_x = C_{0.1} C_{0.2} / (C_{0.1} - C_{0.2}).$$

Резонансный метод замещения положен в основу работы некоторых приборов для непосредственного измерения емкости, индуктивности и добротности катушек.

17.8. Какие косвенные методы измерения емкости можно применить!

Если не требуется большая точность в определении емкости и под рукой нет приборов для непосредственного ее измерения, то можно измерить емкость косвенным методом.

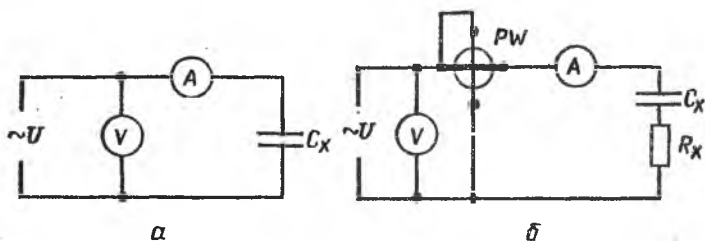


Рис. 17.7. Схемы косвенного измерения емкости:

а — амперметром и вольтметром; б — ваттметром, амперметром и вольтметром.

На рисунке 17.7, а показана схема измерения емкости при помощи амперметра и вольтметра при питании схемы напряжением переменного тока. Вольтметр включен до амперметра, так как сопротивление конденсаторов всегда много больше внутреннего сопротивления амперметра. Если не учитывать обычно малые активные потери конденсатора, то значение измеряемой емкости можно определить по формуле

$$C_x = I_A / (\omega U_V),$$

где I_A — ток, потребляемый конденсатором; U_B — напряжение, подаваемое к конденсатору; ω — угловая частота источника питания.

Погрешность этого метода 1..5 %.

Если конденсатор имеет сравнительно большие активные потери, то, кроме амперметра и вольтметра, необходимо включить еще ваттметр (рис. 17.7, б). Тогда искомая емкость определится через полное и активное сопротивления по формуле

$$C_x = \frac{1}{\omega \sqrt{Z^2 - R^2}} = \frac{I^2}{\omega \sqrt{U^2 I^2 - P^2}},$$

а $\text{tg } \delta_x$ определится через мощность потерь:

$$\text{tg } \delta_x = P_{\omega} C / I^2.$$

Глава 18. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И ФАЗОВОГО СДВИГА

18.1. Как измерить коэффициент мощности?

Для измерения $\cos \varphi$ лучше всего иметь специальные приборы, предназначенные для непосредственного его измерения (п. 18.2), — фазометры. Если таких приборов нет, то измерять коэффициент мощности можно косвенным методом. Например, в однофазной сети $\cos \varphi$ можно определить по показаниям амперметра, вольтметра и ваттметра:

$$\cos \varphi = P / (UI),$$

где P , U , I — показания приборов.

А в цепи трехфазного тока

$$\cos \varphi = P_W / (\sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}),$$

где P_W — мощность всей системы; $U_{\text{л}}$, $I_{\text{л}}$ — линейные напряжение и ток, измеренные вольтметром и амперметром.

В симметричной трехфазной цепи значение $\cos \varphi$ можно определить из показаний двух ваттметров P_{W1} и P_{W2} по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P_{W1} + P_{W2}}{2 \sqrt{P_{W1}^2 + P_{W2}^2 - P_{W1} P_{W2}}}.$$

Общая относительная погрешность рассмотренных методов равна сумме относительных погрешностей каждого прибора, поэтому точность косвенных методов невелика.

Численное значение $\cos \varphi$ зависит от характера нагрузки. Если нагрузкой являются лампы накаливания и нагревательные приборы, то $\cos \varphi = 1$, если нагрузка содержит еще и асинхронные электродвигатели, то $\cos \varphi < 1$. При изменении нагрузки электродвигателя его $\cos \varphi$ существенно изменяется (от 0,1 на холостом ходу до 0,86..0,87 при номинальной нагрузке), изменяется и $\cos \varphi$ сетей.

Поэтому на практике в электрических сетях определяют так называемый средневзвешенный коэффициент мощности за какое-то

определенное время, допустим, за сутки или месяц. Для этого в конце рассматриваемого периода снимают показания счетчиков активной и реактивной энергии W_a и W_p и определяют средневзвешенное значение коэффициента мощности по формуле

$$\cos \varphi_{\text{ср. взв}} = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}}.$$

Это значение $\cos \varphi_{\text{ср. взв}}$ желательно иметь в сельских электрических сетях равным 0,92...0,95.

18.2. Как измерить фазовый сдвиг и $\cos \varphi$ при помощи фазометра?

Измерить непосредственно фазовый сдвиг между напряжением и током нагрузки можно при помощи электродинамических и ферродинамических фазометров. Наибольшее распространение для этих целей получили логометры электродинамической системы (рис. 4.3), в которых неподвижная катушка включена последовательно с нагрузкой, а подвижные катушки — параллельно нагрузке, но так, что ток одной из них отстает от напряжения на угол β_1 (рис. 18.1,

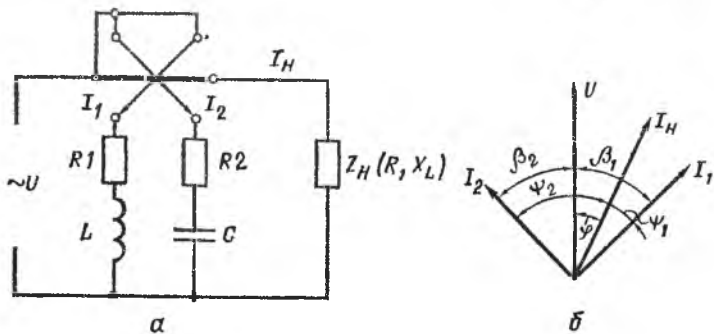


Рис. 18.1. Схема включения фазометра (а) и векторная диаграмма напряжений и токов (б).

а, б). Для этого последовательно с катушкой включена активно-индуктивная нагрузка, а ток другой опережает напряжение на некоторый угол β_2 , для чего включена активно-емкостная нагрузка, причем $\beta_1 + \beta_2 = 90^\circ$ и $|I_1| = |I_2|$.

Угол отклонения стрелки такого прибора зависит только от значения $\cos \varphi$.

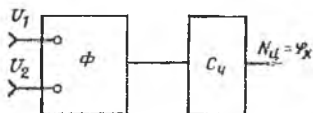
Для измерения фазового сдвига между двумя напряжениями часто применяют цифровые фазометры. В цифровых фазометрах прямого преобразования для измерения фазового сдвига его преобразуют в интервал времени и измеряют последний. Исследуемые напряжения подают на два входа прибора (рис. 18.2), на цифровом отсчетном устройстве (ЦОУ) прибора снимают показания числа импульсов, поступающих на счетчик прибора за один период исследуемых напряжений, которое соответствует фазовому сдвигу в градусах (или в долях градуса).

18.3. Какие фазометры выпускает промышленность!

Из щитовых приборов, предназначенных для измерения, наиболее простой фазометр типа Д31, который может работать в однофазных сетях переменного тока с частотой 50, 500, 1000, 2400, 8000 Гц. Класс точности 2,5. Пределы измерений $\cos \varphi$ 0,5 емк. . . . 1 . . . 0,5 инд. (от 0,5 емкостного фазового сдвига до 1 и от 1 до 0,5 индуктивного фазового сдвига). Приборы включают через измерительные трансформаторы тока с вторичным током 5 А и измерительные трансформаторы напряжения с вторичным напряжением 100 В.

Для измерения $\cos \varphi$ в трехфазной сети при симметричной нагрузке можно применять щитовые фазометры типа Д301. Класс их точности 1,5. Пределы измерений $\cos \varphi$ 0,5 емк. . . . 1 . . . 0,5 инд. и 0,9 емк. . . . 1 . . . 0,2 инд. Последовательные цепи включают на ток 5 А непосредственно, а также через трансформатор тока. Па-

Рис. 18.2. Схема измерения фазового сдвига цифровым фазометром.



раллельные цепи включают непосредственно на 127, 220, 380 В, а также через измерительные трансформаторы напряжения.

Из переносных для однофазной цепи удобны фазометры типа Д578. Класс точности 0,5. Пределы измерений 0 емк. . . . 1 . . . 0 инд.

Для измерения $\cos \varphi$ в трехфазной сети из переносных приборов можно отметить ваттметры типа Д120. Пределы измерений: 0,9 емк. . . . 1 . . . 0,2 инд. Основная погрешность $\pm 1,5 \%$.

Если необходимо получить представление об изменении $\cos \varphi$ во времени, то удобно применить самопишущие фазометры, например типа Н351. Фазометр Н351 может работать в однофазной сети с частотой 50 Гц. Пределы измерений: 0,5 емк. . . . 1,0 . . . 0,5 инд. Номинальное напряжение 100, 127, 220, 380 В, ток 5 А.

18.4. Какими осциллографическими методами можно воспользоваться для определения фазового сдвига!

Фазовый сдвиг между двумя периодическими напряжениями можно измерить при помощи электронно-лучевого осциллографа методом эллипса или по осциллограммам исследуемых напряжений.

В первом случае исследуемые сигналы U_1 и U_2 подают на входы Y и X осциллографа.

Рассмотрим случай, когда частоты напряжений равны.

Обычно усиление Y и X регулируют так, чтобы полные отклонения луча по осям X и Y были равны: $Y_m = X_m$, тогда на экране осциллографа будет получено изображение эллипса. Определив размеры X и X_m (рис. 18.3, а), можно вычислить фазовый сдвиг по формуле

$$\sin \varphi_x = X/X_m.$$

Погрешность этого метода 1 . . . 2 %. Чем ближе угол φ к 90° , тем больше погрешность.

Фазовый сдвиг между периодическими напряжениями различной частоты можно легко определить по фигурам Лиссажу, возникающим на экране осциллографа, если отношение частот выражается рациональным числом. В этом случае результирующая кривая

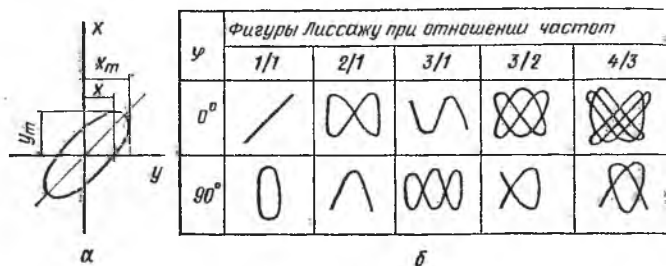


Рис. 18.3. Определение фазового сдвига по осциллограмме исследуемых напряжений:

а — методом эллипса; б — по фигурам Лиссажу.

замкнута и представляется на экране в виде неподвижного изображения (рис. 18.3, б).

Можно измерить фазовый сдвиг методом линейной развертки при помощи двухлучевого осциллографа или одноплучевого осциллографа с электронным коммутатором (рис. 18.4, а). В этом случае

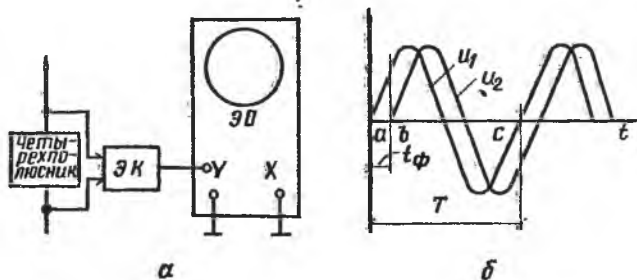


Рис. 18.4. Измерение фазового сдвига методом линейной развертки:

а — схема измерения; б — осциллограмма напряжений.

на экране осциллографа устанавливаются неподвижные осциллограммы обоих напряжений. Если измерить отрезки ab и ac , соответствующие времени t_ϕ и T (см. рис. 18.4, б), то можно вычислить значение фазы по формуле

$$\varphi_x = t_{ab} \cdot 360 / T$$

Погрешность метода определяется неточностью измерения отрезков ab и ac .

Можно записать изменение двух или нескольких переменных

величин на фотопленке светолучевого осциллографа с одной нулевой осью и, зная угловой масштаб, при последующей обработке осциллограмм определить фазовый сдвиг и характер нагрузки.

Глава 19. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ТОКА

19.1. Как и какими средствами можно измерить частоту тока?

Частоту тока можно измерить непосредственно частотомерами и косвенными методами.

Для измерения частоты тока в пределах промышленной (50 Гц) применяют вибрационные приборы. Принцип работы такого прибора заключается в том, что по катушке 1 (рис. 19.1, а) пропускают

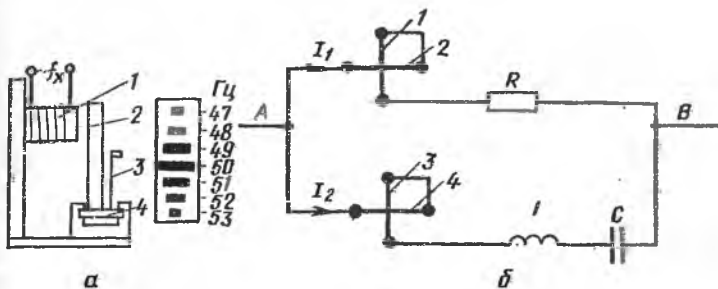


Рис. 19.1. Устройство вибрационного (а) и электродинамического (б) частотомеров.

ток измеряемой частоты, при этом то притягивается к катушке, то отталкивается от нее с этой же частотой якорь 2, связанный с основанием 4. Последнее колеблется с такой же частотой. На основании расположен набор специальных пластин 3, каждая из которых имеет определенную собственную частоту колебания. Вместе с основанием колеблются и пластины, причем наибольшая амплитуда у той пластины, собственная частота колебаний которой равна частоте измеряемого тока. По шкале прибора в зависимости от амплитуды колебаний пластин можно определить значение частоты тока или подаваемого к катушке напряжения.

Из промышленных частотомеров вибрационной системы можно отметить частотомеры типа В80 класса точности 1,0 с пределом измерений частоты 48...52 Гц на напряжение питания 100, 127, 220 В. Потребляемая мощность 2 В·А.

Точность таких частотомеров мала, диапазон измерений частоты ограничен, поэтому в последнее время вибрационные приборы заменяют приборами других систем.

Очень удобно измерять частоту при помощи электродинамического логометра, в котором одна часть токовой катушки 2 соединена последовательно с одной из подвижных катушек 1 логометра, вторая половина токовой катушки 4 включена последовательно со второй подвижной катушкой 3 (рис. 19.1, б). Причем последовательно с

первой парой катушек включено активное сопротивление R , а последовательно с другой парой катушек — индуктивно-емкостное сопротивление. При подаче к зажимам AB прибора напряжения определенной частоты по цепи катушек проходят токи I_1 и I_2 . Значение тока I_1 не зависит от частоты тока, а значение тока I_2 зависит.

В связи с тем, что угол отклонения стрелки электродинамического прибора зависит от отношения токов I_1 и I_2 , то при изменении частоты и тока I_2 изменяется угол отклонения стрелки прибора, и шкалу такого прибора можно отградуировать в единицах частоты.

Широко применяются частотомеры, выполненные на базе электромагнитных логометров. На рисунке 19.2, *а* показана конструкция, а на рисунке 19.2, *б* — электрическая схема такого логометра. Токи в цепях логометра распределяются обратно пропорционально полным сопротивлениям ветвей и по-разному зависят от частоты

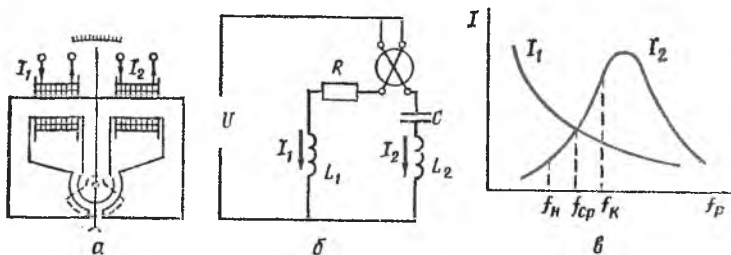


Рис. 19.2. Электромагнитный частотомер:

а — устройство; *б* — электрическая схема; *в* — зависимость токов I_1 и I_2 от частоты тока в сети.

(рис. 19.2, *в*). Параметры цепей подобраны так, что при средней частоте диапазона f_{cp} токи в рамках равны, а следовательно, вращающие моменты, действующие на подвижную систему логометра, равны между собой, и стрелка прибора занимает среднее положение. Если теперь частота тока в сети будет увеличиваться, то ток I_2 , потребляемый резонансным контуром L_2-C , начнет увеличиваться, а ток I_1 уменьшаться. В результате момент, действующий на подвижную систему логометра, отклонит стрелку прибора в одну сторону, например в сторону, указывающую на большую частоту тока f_K . Если частота тока станет меньше f_{cp} , то, наоборот, ток I_1 станет больше I_2 , вся подвижная система вместе со стрелкой отклонится в противоположную сторону и укажет на уменьшение частоты тока в сети. Такие электромагнитные частотомеры просты по устройству и позволяют настраивать колебательный контур L_2-C на разные резонансные частоты.

Промышленность выпускает несколько частотомеров электромагнитной системы, например типа Э371 и Э372.

Частотомеры Э371 класса точности 2,5 имеют три модификации с пределами измерений 45. . .55 и 450. . .550 Гц на номинальные напряжения 127, 220, 380 В; 45. . .55 и 450. . .550 Гц на номинальное напряжение 100 В, то есть включение через измерительные трансформаторы напряжения; 180. . .220 Гц при напряжении 220 В — непосредственного включения.

Самопишущие частотомеры изготавливают магнитоэлектрические

кой системы. Достоинство этих приборов — наличие больших вращающихся моментов. Прибор выполнен по системе логометра, имеет два выпрямительных моста. На рисунке 19.3 показана принципиальная схема регистрирующего выпрямительного частотомера.

Из схемы видно, что рамка $P1$ логометра питается через выпрямительный мост $VD1...VD4$, включенный в резонансный контур $L-C$, настроенный на частоту, немного превышающую номинальную. Рамка $P2$ питается через выпрямительный мост $VD5...VD8$, включенный в цепь с активным сопротивлением R , следовательно, сила тока в ней не зависит от частоты. Поэтому любому отклонению частоты измеряемого тока от резонансного значения будет соответствовать определенное отношение токов I_1/I_2 , а сле-

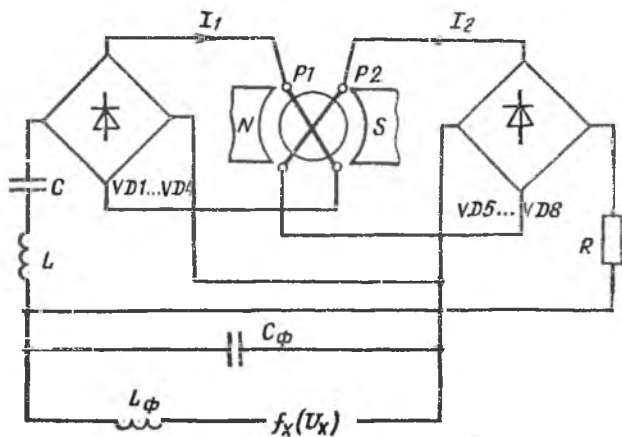


Рис. 19.3. Принципиальная схема регулирующего выпрямительного частотомера.

довательно, определенный угол отклонения стрелки прибора α . Шкала прибора может быть отградуирована в единицах частоты.

Из промышленных частотомеров такого типа можно отметить частотомеры Н345 класса точности 4,0 с пределами измерений от 45 до 51 и от 48 до 52 Гц и класса точности 2,5 с пределом измерений от 45 до 55 Гц. Приборы рассчитаны на напряженне 100, 127, 220, 380 В.

Удобно при измерении частоты тока пользоваться цифровыми частотомерами (см. п. 19.4).

19.2. Как измерить частоту тока косвенным методом?

Если под рукой нет специального прибора для измерения частоты и не требуется высокая точность измерения, то можно воспользоваться косвенным методом измерения. Для этой цели в цепь переменного тока с напряжением U включают конденсатор с известной емкостью C_0 и амперметр для измерения тока. Тогда значение частоты тока может быть определено по формуле

$$f = I / (2\pi C_0 U_c).$$

Вместо емкости в цепь переменного тока можно включить образцовую катушку с индуктивностью L_0 . Тогда значение измеряемой частоты можно определить как

$$f = U_L / (2\pi I L_0).$$

Этот метод применяется на частотах от 10 Гп до сотен килогерц. Приборы, основанные на этом методе, например ЧЗ-7, имеют погрешность 1,5...2%.

Измерить частоту переменного тока можно при помощи осциллографа. Например, в электронных осциллографах (см. п. 7.2) частоту тока очень удобно измерять при помощи кривых Лиссажу. Для этого напряжение с измеряемой частотой тока подают на вход

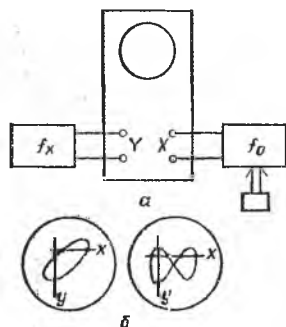


Рис. 19.4. Измерение частоты переменного тока при помощи осциллографа:

a — схема включения осциллографа; *б* — определение частоты тока по фигурам Лиссажу.

усилителя горизонтального отклонения, а напряжение с известной образцовой частотой f_0 — на вход усилителя вертикального отклонения (рис. 19.4, *a*) при включенной внутренней развертке. Образцовая частота f_0 подается от специального генератора, например генератора звуковой частоты, который позволяет плавно и в больших пределах изменять частоту.

Изменяя частоту f_0 , добиваются получения на экране неподвижной фигуры Лиссажу. Для определения частоты неизвестного напряжения полученную фигуру Лиссажу пересекают (мысленно) горизонтальной и вертикальной линиями (рис. 19.4, *б*), которые не должны проходить через точку пересечения самой фигуры. Подсчитывают, сколько раз оси x и y пересекли кривую Лиссажу, то есть определяют n_x и n_y . Отношение n_x/n_y равно отношению частот, следовательно,

$$f_x = f_0 n_x / n_y.$$

Точность измерения частоты тока при помощи кривых Лиссажу зависит от точности измерения образцовой частоты. При определенных навыках это очень удобный и быстрый способ определения частоты переменного тока. Этот способ целесообразно применять при кратности частот до 10.

При низких частотах фигура Лиссажу вращается достаточно медленно, поэтому можно измерить время ее полного оборота $T_{вр}$ и ввести поправку:

$$n_x f_x = f_0 n_y \pm 1/T_{вр}.$$

Знак поправки можно определить, изменяя частоту в сторону увеличения и в сторону уменьшения. Если изменение f_x в сторону увеличения приводит к замедлению вращения или к вращению в обратную сторону, то знак поправки отрицательный, а если фигура вращается быстрее, то знак положительный.

Если нет возможности получить кривую Лиссажу, но есть возможность получить четкую картину напряжения, частота тока кото-

рого нас интересует, то можно на кривую этого напряжения нанести метки. Длительность меток строго постоянна, поэтому, подсчитав, сколько меток помещается на кривой длиной, равной периоду, можно, умножив число меток на их длительность, определить продолжительность периода измеряемого напряжения, а следовательно, и частоту, так как частота — это величина, обратная периоду. Этот метод менее точный, чем предыдущий, но в случае необходимости с его помощью можно ориентировочно оценить частоту подаваемого напряжения или тока.

19.3. Как измерить частоту методом заряда-разряда конденсатора!

Непосредственно частоту тока можно измерить при помощи заряда и разряда конденсатора. Принцип действия такого частотомера основан на определении среднего значения разрядного тока конденсатора C . Если периодически с частотой измеряемого тока f_x переключать конденсатор с источника питания (положение 1) на разрядное сопротивление $R_{разр}$ и измерительный прибор, то конденсатор будет то заряжаться до напряжения U_1 , то разряжаться до напряжения U_2 (рис. 19.5). При этом количество электрического заряда, отдаваемое конденсатором прибору, будет равно

$$f_x q = C (U_1 - U_2) f_x$$

Среднее значение силы тока, протекающего через измерительный прибор, линейно связано с частотой переключения конденсатора, то есть измеряемой частотой

$$f_x = \frac{I_{ср}}{C (U_1 - U_2)}$$

Следовательно, шкалу измерительного прибора можно отградуировать в единицах измерения частоты. Основная погрешность измерения частотомерами с конденсатором обычно не превышает $\pm 2\%$, а пределы измерений достигают несколько сотен килогерц.

19.4. Как измерить частоту при помощи цифровых измерительных приборов!

Измерение частоты при помощи ЦИП основано на преобразовании исследуемого сигнала в последовательность кратковременных импульсов той же частоты и счете числа N_x этих импульсов за известный строго определенный интервал времени T_c (время счета).

Так как прибор измеряет усредненное значение частоты, точность растет с увеличением частоты и T_c . Например, при $f_x = 100$ МГц $\delta_d = 10^{-6}\%$, а при $f_x = 50$ Гц $\delta_d = 2\%$. Чтобы уменьшить погрешность измерения при $f_x = 50$ Гц до $\delta_d = 0,02\%$, необходимо увеличить T_c до 100 с, что уменьшит быстродействие прибора.

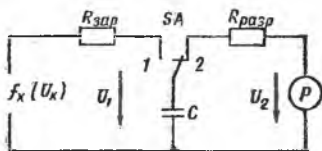


Рис. 19.5. Схема для определения частоты тока при помощи конденсатора.

Следовательно, измерять цифровым частотомером низкие частоты нецелесообразно. Для измерения низких частот применяются цифровые хронометры (периодомеры), которые измеряют промежуток времени (период колебаний) с представлением результата в цифровой форме. Частота в этом случае определяется как $f_x = 1/T$.

Промышленность выпускает универсальные приборы, позволяющие измерять частоту f , отношение частот f_1/f_2 , период синусоидальных колебаний T , длительность импульса $t_{и}$, длительность паузы $t_{п}$ и любой интервал времени Δt , их также можно использовать как счетчики числа импульсов. Такие приборы часто называют цифровыми частотомерами.

Примером универсального ЦИП является цифровой частотомер ЧЗ-38. Прибор имеет восемь десятичных знаков на ЦОУ. Для расширения диапазонов измерений и перечня измеряемых величин предусмотрены сменные вставные блоки.

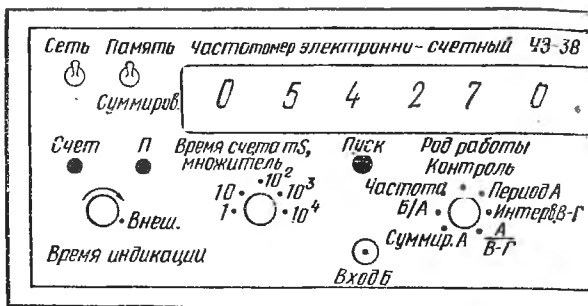


Рис. 19.6. Лицевая панель универсального частото-

На лицевой панели (рис. 19.6) прибора имеется 7 входов, 17 органов управления, цифровой индикатор и два вспомогательных индикатора (лампочки «Счет» и «П» — переполнение).

Для выбранного режима измерения задаются параметрами Δt_0 , k , T_c . Значения заданной длительности импульса Δt_0 в миллисекундах и безразмерные значения коэффициента k , определяющие число периодов, по которым ведется усреднение измеряемой величины, задаются положением ручки переключателя «Время счета mS , множитель» и составляют 1, 10, 10^2 , 10^3 , 10^4 мс.

Значение T_c определяется положением ручки переключателя «Метки времени» и составляет 0,1; 1; 10 мкс; 0,1; 1 мс.

Изменяя положение ручек переключателей «Время счета mS , множитель» и «Метки времени», можно получать числа $N_{ц}$ с разным числом десятичных разрядов. Если счетчик импульсов переполнен; загорается лампочка «П».

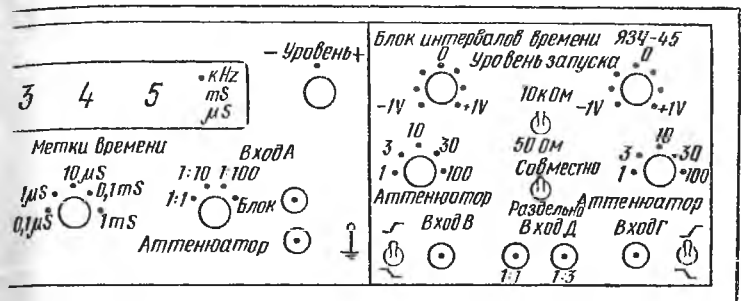
Положение этих же ручек определяет место запятой на индикаторе. Вместе с изменением положения ручки «Род работы» изменяется буквенное обозначение единиц измерения (перед нужным обозначением появляется светящаяся точка).

Назначение переключателей «Род работы», «Совместно-раздельно» и аттенуаторов входов А, В, Г поясняет таблица 19.1. Тумблером «Сеть» питание подается на схему прибора. Если вилка

шнура питания включена в розетку, а тумблер «Сеть» выключен, то питание подается только на генератор частоты. Это сделано для экономии времени, так как характеристики погрешности δf_0 гарантируются только после двух часов самопрогрева прибора.

Тумблер «Память — суммирование» позволяет выбрать один из вариантов: либо во время очередного процесса счета индуцируется результат предыдущего измерения («Память»), либо процесс счета виден на индикаторе («Суммирование»).

Для измерения числа колебаний нужно установить исходное положение «Память», осуществить сброс нажатием кнопки «Пуск», в момент начала отсчета переключить тумблер в положение «Суммирование» и по окончании счета вернуть его в положение «Память». Ручка «Время индикации» должна при этом измерении находиться в крайнем левом положении.



мера ЧЗ-38.

Регулировки «Уровень» в основной части прибора и «Уровень запуска» в блоке ЯЗЧ-45 служат для выбора порогового уровня входного напряжения. Это создает возможность исследования сигналов сложной формы. Так, например, при установке порогового уровня $U_{п1}$ в канале А в режиме измерения периода T могут получаться неверные результаты, чередующиеся случайным образом, а при установке уровня $U_{п2}$ получится результат, действительно соответствующий измеряемому периоду. Обычно вращением ручки «Уровень» находят зону правильных показаний и рукоятку устанавливают примерно на середину. При регулировке уровня следует правильно выбрать положение ручки «Аттенюатор». При отрицательных импульсах ручку устанавливают в зоне, соответствующей диапазону от 0 до $U_{п max}$. При синусоидальном напряжении в канале А ручку устанавливают в среднее положение (нулевое).

Методика регулировки уровней каналов В и Г заключается в следующем. Пусть, например, нужно измерить интервал времени, задаваемый по двум каналам (начало по каналу В, конец — по каналу Г), причем в канале В импульсы положительные, а в канале Г — отрицательные (частота одинаковая). В этом случае ручку «Уровень запуска» устанавливают в положение «-IV» (рис. 19.6) в канале В и «+IV» в канале Г. Далее поворотом ручки «Уровень запуска» канала В по часовой стрелке находят границу зоны, в которой открыт селектор; в этой зоне светится лампочка «Счет»

19.1. Положение переключателей при измерении параметров исследуемых сигналов

Измеряемая величина	Положение переключателей					
	«Род работы»	«Время счета т.С. множитель»	«Метки времени»	«Аттенюатор входа А»	«Аттенюаторы входов В и Г»	«Совместно—раздельно»
Частота тока f до 50 МГц	«Частота»	В зависимости от значения f и от желаемого m	Любое	«1:1», или «1:10», или «1:100» в зависимости от напряжения на входе А	Любое	
Период синусоидальных колебаний T	«Период А»	В зависимости от значения T	В зависимости от значения T и от желаемого m			
Отношение частот f_1/f_2 , поступающих на входы В и А	«В/А»	Любое				
Число импульсов, поступающих на вход А	«Суммирование»					
—	«Контроль»	По выбору				

Измеряемая величина		Положение переключателей					
		«Род работы»	«Время счета mS , множитель»	«Метки времени»	«Аттенюатор входа А»	«Аттенюаторы входов В и Г»	«Совместно — раздельно»
Интервал времени Δt : заполняемый от внутреннего генератора, задаваемый	по одному каналу	«Интервал В—Г»	Любое	В зависимости от значения Δt и от желаемого m	«Блок»	«1», или «3», или «10», или «30», или «100» в зависимости от напряжений на входах В и Г	«Совместно»
	по двум каналам						«Раздельно»
заполняемый от внешнего генератора, задаваемый	по одному каналу	« $\frac{A}{B-G}$ »	Любое	«1:1», или «1:10», или «1:100» в зависимости от напряжения на входе А	«1:1», или «1:10», или «1:100» в зависимости от напряжений на входе А	«Совместно»	
	по двум каналам					«Раздельно»	
Частота тока f более 50 МГц		«Частота»	В зависимости от значения f и от желаемого m	Любое	«Блок»	Любое	

и непрерывно нарастает число на цифровом индикаторе (тумблер «Память» находится в положении «Суммирование»). Ручку «Уровень запуска» следует установить примерно в середине этой зоны. Затем поворотом ручки «Уровень запуска» канала Г против часовой стрелки находят границы зоны, в которой закрыт селектор, и устанавливают ручку примерно в середине этой зоны. Ручки аттенуаторов каналов В и Г регулируют аналогично рассмотренному выше для канала А.

При помощи тумблеров, расположенных около входов В и Г, выбирают фронт входного напряжения измеряемого интервала времени. Верхнее положение тумблера соответствует положительному фронту, нижнее — отрицательному. Тумблером «10 кОм — 50 Ом» устанавливают соответствующие этому обозначению сопротивления в каналах В и Г.

Значение относительной погрешности измерений частоты нормируется как сумма двух составляющих

$$\delta_f = \pm (\delta_0 + \delta_d),$$

где δ_0 — погрешность из-за ухода частоты генератора; δ_d — погрешность дискретности.

Обычно в цифровых измерительных приборах δ_0 не превосходит в сутки $5 \cdot 10^{-9}$, а в год — 10^{-6} . Погрешность дискретности определяется по формуле

$$\delta_d = 1/N_x = 1/f_x T_c,$$

где f_x — измеряемая частота; T_c — время счета.

Например, пусть имеется цифровой частотомер со следующими данными, указанными в паспорте прибора: $\delta_0 = 10^{-6}$, $N_{\max} = 999999$; $f_{\max} = 10$ МГц; $\Delta t_0 = 0,1; 1,0; 10$ с.

Выберем $\Delta t_0 = 1$ с. Допустим, измеряемая частота $f_x = 307341,52$ Гц. При этом $N = \Delta t_0 f_x = 1 \cdot 307341,52 = 307341,52 < N_{\max}$, то есть переполнения нет, тогда получим на ЦОУ результат 3,07341 МГц. Относительная погрешность

$$\delta = \pm \left(10^{-6} + \frac{1}{307341} \right) \approx \pm 4,25 \cdot 10^{-6} = \pm 4,25 \cdot 10^{-4} \%$$

ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Глава 20. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

20.1. Какими методами и средствами измерений пользуются при измерении температуры?

В агропромышленном комплексе для измерения температуры используют главным образом методы, основанные на изменении электрического сопротивления различных материалов (металлов, их сплавов, полупроводников) при изменении температуры. Все эти методы относятся к контактным, так как термоэлектротеплопреобразователь того или иного вида обычно помещают в среду, температуру которой измеряют. Термоэлектротеплопреобразователи обычно используют в комплекте со вторичными измерительными приборами.

Для преобразования сопротивления термоэлектротеплопреобразователя в напряжение или ток, а также компенсации температурных погрешностей в схемах измерения температуры применяют уравновешенные и неуравновешенные аналоговые и цифровые мосты, автоматические потенциометры.

В качестве термоэлектротеплопреобразователей в основном применяют термометры сопротивления (диапазон измеряемых температур от -200 до $+650$ °С), термоэлектрические термометры (от -50 до $+1800$ °С), термометры расширения (от -180 до $+650$ °С), манометрические термометры (от -160 до $+600$ °С).

20.2. Как измерить температуру при помощи термоэлектрического термометра?

При измерении температуры воздушного потока или потока жидкости термоэлектрическим термометром (см. п. 11.6) его чувствительный элемент (точку спая) устанавливают перпендикулярно потоку или под углом к нему (навстречу потоку). Рабочий спай желательно располагать на оси потока. Если термопара устанавливается в камере технологического оборудования или воздухопроводе, то выступающая часть должна быть не менее 20 мм. Если термопара устанавливается горизонтально, то выступающая ее часть при длине свыше 500 мм должна иметь опору.

Перед установкой термопары к стенкам технологического оборудования приваривают патрубки или бобышки, которые служат для установки термометров.

Свободные концы термопары при помощи соединительных проводов соединяют с измерительным прибором через колодку зажимов. Сумма сопротивления соединительных проводов и термопары должна быть меньше значения, указанного на шкале милливольтметра.

Если это условие не выполняется, то для подгонки сопротивления пользуются добавочным резистором (подгоночной катушкой).

Одна из особенностей работы с термоэлектрическими термометрами заключается в том, что с целью уменьшения погрешности измерений необходимо обеспечивать постоянство температуры свободных концов. Поскольку в зоне расположения головки температура может колебаться, то при помощи специальных компенсационных проводов, близких по характеристикам к термоэлектродам термопар, эти свободные концы стремятся удалить подальше от объекта, в зону постоянной температуры к вторичному прибору. Однако при значительной длине соединительной линии это не всегда удается.

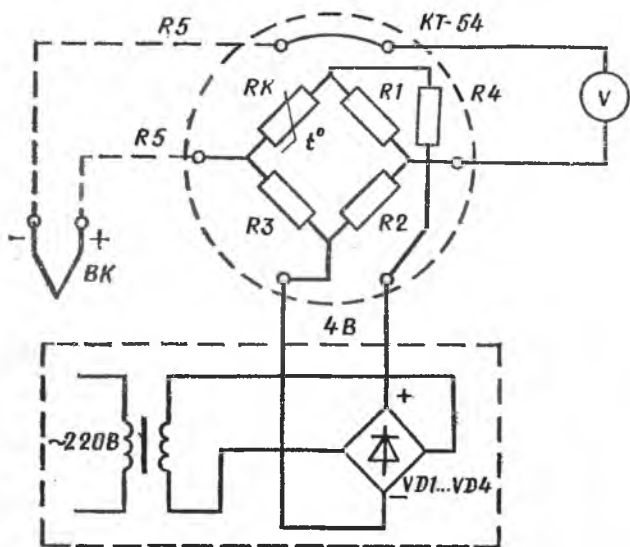


Рис. 20.1. Схема термометра с компенсационной коробкой типа КТ-54.

В этом случае компенсационные провода доводят до зоны постоянной температуры, а далее прокладывают медные соединительные провода.

Компенсационные провода выпускают длиной от 20 до 50 м типов ПВК, ПКВГ, ПКВП ($t_{\text{возд}} = 40 \dots 60^\circ\text{C}$, $\psi = 98\%$), ПКЛ, ПКЛЭ ($t_{\text{возд}} < 80^\circ\text{C}$, сухие помещения), КПЖ ($t_{\text{возд}} > 100^\circ\text{C}$), причем провода повышенной гибкости ПКВГ и ПКВП можно использовать на передвижных объектах (тракторах, комбайнах).

Для автоматической компенсации температуры в схемах применяют коробки типа КТ-54, представляющие собой неуравновешенный мост (рис. 20.1) с питанием от источника постоянного тока. При отклонении температуры окружающей среды от 20°C равновесие моста нарушается. Значение разности потенциалов в диагонали моста всегда равно изменению ЭДС термопары, но с противоположным знаком; таким образом компенсируется температурная погреш-

ность измерения. При использовании коробки КТ-54 перед измерением при отключенном приборе при помощи корректора устанавливается стрелку на нуль. При подключении измерительных приборов следует соблюдать полярность. Полярность термоэлектродов указана на термопаре.

Для градуировок термоэлектрических термометров компенсационные коробки снабжены сменными добавочными резисторами, параметры которых указаны в техническом паспорте коробки.

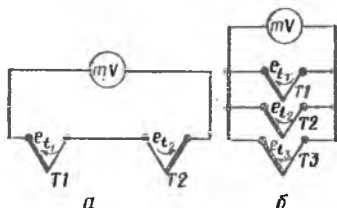
При длительной эксплуатации термоэлектрических термометров необходимо периодически проверять их по графикам и специальным градуировочным таблицам.

Термоэлектрические термометры удобно применять для измерений высоких температур и в труднодоступных местах.

Удобно пользоваться термопреобразователями, когда необходимо знать разность температур между какими-то двумя точками,

Рис. 20.2. Схемы включения термоэлектрических преобразователей:

а — при измерении разности температур между двумя точками; б — при измерении средней температуры нескольких точек.



в одну из которых помещают одну термопару, а в другую — вторую термопару. Термопары при этом включают встречно (рис. 20.2, а), и тогда измерительный прибор измеряет разность термо-ЭДС $e_{t_1} - e_{t_2} = \Delta e$, которая и пропорциональна разности температур. Шкалу такого измерительного прибора можно отградуировать непосредственно в градусах.

Целесообразно применять термопары при измерении средней температуры нескольких точек. В этом случае точки спая термопар помещают в точки измерения, термопары включают параллельно между собой (рис. 20.2, б). Измерительный прибор в этом случае показывает среднее значение термо-ЭДС, которое, в свою очередь, пропорционально средней температуре нескольких точек.

20.3. Как измерить температуру при помощи термометра сопротивления?

При выборе термометра сопротивления, кроме таких его характеристик, как диапазон измеряемых температур, область применения, степень защиты от окружающей среды, необходимо учитывать следующее: металлические терморезисторы имеют большую инерционность (см. табл. 11.2), но обеспечивают высокую точность измерений, имеют линейную статическую характеристику, при их помощи нельзя измерить температуру в точке. Полупроводниковые терморезисторы имеют высокую чувствительность, при их помощи можно измерить температуру в точке, но характеристика их нелинейна (см. рис. 11.6), для них характерна нестабильность параметров.

Термометр сопротивления всегда применяют вместе с вторичными приборами (см. п. 11.7, п. 20.4, п. 20.5, п. 20.6) и источником питания. Термометры сопротивления устанавливают таким образом, чтобы чувствительный элемент был в центре среды, в которой измеряется температура. Требования к монтажу термометров сопротивления аналогичны требованиям к монтажу термоэлектрических термометров (см. п. 20.2).

Провода, соединяющие термометр сопротивления с измерительным прибором, должны иметь определенное сопротивление, поэтому измерительный прибор обычно имеет подгоночные катушки.

20.4. В чем особенность измерения температуры термометром сопротивления, вторичным измерительным прибором которого является уравновешенный мост?

Принципиальные электрические схемы уравновешенных измерительных мостов показаны на рисунке 20.3. На рисунке 20.3, а приведена схема включения терморезистора RK в мостовую схему

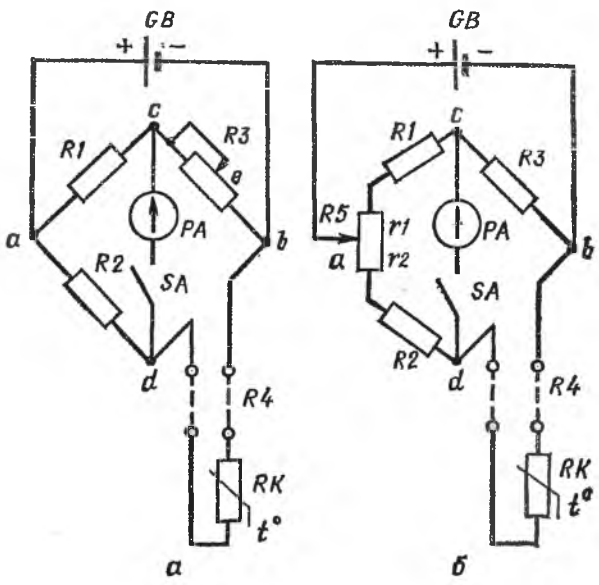


Рис. 20.3. Термометры с уравновешенной мостовой схемой: а — с влиянием сопротивления переходного контакта; б — без влияния контакта.

с плавно изменяющимся сопротивлением плеча сравнения $R3$. При изменении температуры сопротивление терморезистора изменяется, нарушается балансировка моста, и через гальванометр при нажатой кнопке SA начинает протекать ток. Изменяя сопротивление

ние плеча сравнения R_3 , добиваются того, что ток гальванометра PA становится равным нулю, то есть уравнивают мост.

Значение сопротивления R_t терморезистора RK можно определить по формуле

$$R_t = (R_2/R_1) R_3 - R_4.$$

Отсюда видно, что результат измерения зависит от сопротивления R_4 соединительных проводов линии.

Учитывая, что для данного моста отношение сопротивлений плеч R_2/R_1 и сопротивление линии — величины постоянные, можно сказать, что каждому значению R_t будет соответствовать определенное значение R_3 , а поэтому реохорд может быть отградуирован в градусах Цельсия. Основной недостаток данной схемы в том, что на результат измерения оказывает значительное влияние переходное сопротивление подвижного контакта реохорда R_3 . С этой точки зрения более удачна схема включения терморезистора в мост с плавным изменением отношения сопротивления плеч R_2/R_1 при помощи дополнительного реохорда R_5 (рис. 20.3, б). Переходное сопротивление подвижного контакта этого реохорда включается в питающую диагональ моста ab и практически не влияет на результат измерения. Тогда

$$R_t = \frac{R_2 + r_2}{R_1 + r_1} R_3 - R_4.$$

Из этого уравнения видно, что на результат измерения и в этом случае оказывают влияние соединительные провода R_4 . Поэтому, если возникает необходимость устранить влияние сопротивления провода R_4 , применяют трехпроводную схему включения термометра сопротивления в мост (рис. 20.4, а). В этом случае соединительный провод 1, включенный в питающую диагональ моста, не оказывает влияния на результат измерения. Провод 2 включают последовательно с резистором R_3 , а третий соединительный провод 3 — последовательно с терморезистором RK . Если мост выполнить симметричный ($R_1 = R_3$) и если соединительные провода имеют одинаковые сопротивления, то

$$R_t = R_3.$$

Это означает, что в таких мостах полностью устранено влияние сопротивления соединительных проводов на результат измерения.

Уравновешенные мосты обеспечивают высокую точность и не требуют стабилизированного источника питания.

20.5. Как использовать неуравновешенный мост для измерения температуры в комплекте с термометром сопротивления!

Неуравновешенный мост (рис. 20.4, б) собирают из постоянных резисторов R_1, R_2, R_3 , в качестве четвертого плеча включают либо контрольный резистор R_5 (переключатель SA в положении K), либо терморезистор RK (переключатель SA в положении $И$).

При включении терморезистора RK значение тока в цепи милливольтметра PV можно определить по формуле

$$I = \frac{U_{ab} [R_2 R_3 - R_1 (R_t + R_4)]}{R_6 (R_2 + R_t + R_4) (R_1 + R_3) + R_1 R_3 (R_2 + R_t + R_4) + R_2 (R_t + R_4) (R_1 + R_3)}$$

Как видно из формулы, ток, протекающий через милливольтметр, зависит от напряжения U_{ab} , подаваемого на питающую диа-

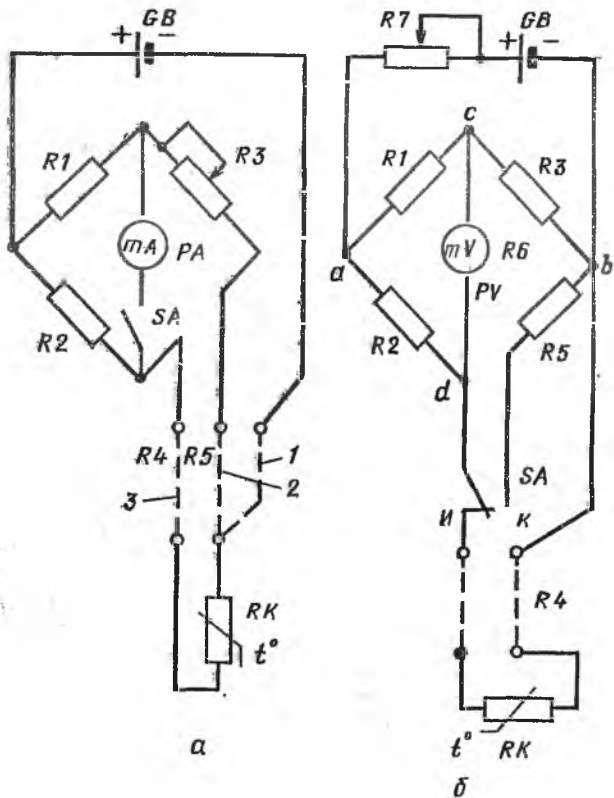


Рис. 20.4. Схемы включения терморезисторов: a — трехпроводная с уравновешенным мостом; b — двухпроводная с неуравновешенным мостом.

гональ моста. Следовательно, необходимо его поддерживать постоянным путем изменения сопротивления резистора R_7 при включенном контрольном резисторе R_5 до установки стрелки милливольтметра PV на контрольную отметку. Неуравновешенные мосты промышленность не выпускает, но, несмотря на это, их широко при-

меняют при измерении различных электрических величин, в том числе и в сельскохозяйственном производстве. Это объясняется тем, что для конкретной схемы неуравновешенного моста сопротивления резисторов R_1, R_2, R_3, R_4, R_6 постоянны. Если напряжение U_{ab} поддерживать постоянным, то ток милливольтметра в этом случае будет зависеть только от значения сопротивления терморезистора R_K . Поэтому шкалу измерительного прибора можно отградуировать в единицах измеряемой температуры и получить стрелочный показывающий термометр сопротивления.

Однако точность измерений неуравновешенными мостами значительно ниже, чем уравновешенными. Поэтому, если требуется высокая точность измерений или измерение температуры во времени, то лучше применять термосопротивление с вторичным прибором, выполненным в виде автоматического уравновешенного моста.

20.6. Какие автоматические мосты для измерения температуры выпускает промышленность? Как они работают?

Промышленность выпускает для измерения температуры автоматические мосты следующих типов: КСП4 — полногабаритный с диаграммной лентой, КСМ3 — малогабаритный с диаграммным диском, КСМ2 — малогабаритный с диаграммной лентой, КСМ1 — миниатюрный с диаграммной лентой и др.

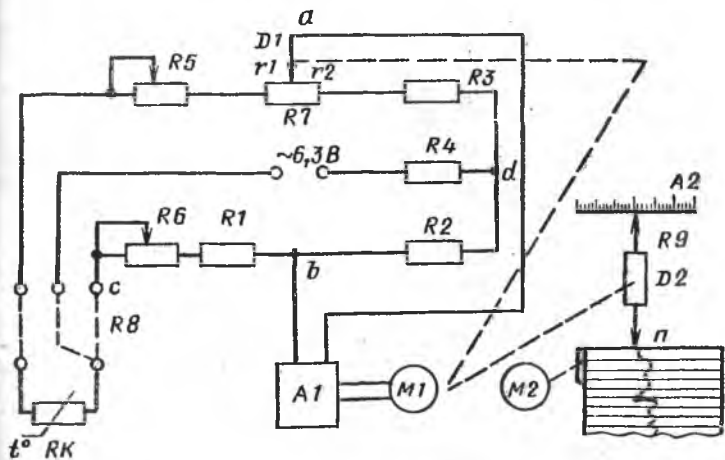


Рис. 20.5. Принцип работы автоматического моста при измерении температуры.

Принцип работы автоматического уравновешенного моста при измерении температуры рассмотрим на примере принципиальной схемы автоматического уравновешенного моста типа КСП4 (рис. 20.5). Уравновешенный мост собран из постоянных резисторов $R_1,$

$R2$, $R3$, из подгоночных $R5$ и $R6$, линейного резистора $R7$ с подвижным движком $D1$ и терморезистора RK , который подключают по трехпроводной линии связи $R8$. Питается мост переменным напряжением 6,3 В через балластный резистор $R4$. В измерительную диагональ моста включен электронный усилитель $A1$, который усиливает возникающее напряжение небаланса моста U_{ab} и подает его на рабочий двигатель $M1$.

Принцип работы автоматического моста заключается в том, что при подключении терморезистора RK (см. п. 11.7) или при изменении его сопротивления под действием измеряемой температуры происходит разбалансировка моста и в измерительной диагонали моста появляется напряжение небаланса U_{ab} , которое усиливается электронным усилителем $A1$ и подается на управляющую обмотку рабочего двигателя $M1$. Двигатель начинает работать и через систему передач перемещает движки $D1$ линейного реохорда $R7$ и $D2$ отсчетного устройства $A2$.

Перемещение движка $D1$ происходит до тех пор, пока напряжение U_{ab} не станет равным нулю (только при этом условии рабочий двигатель перестанет работать). Если дальнейшего изменения температуры не произойдет, то подвижная система остановится, как и стрелка отсчетного устройства $A2$, а также перо Π самопишущего устройства. По отсчетному устройству можно визуально наблюдать за изменением температуры, а если запустить синхронный двигатель $M2$ лентопротяжного механизма, то на диаграммной ленте останется запись графика изменения температуры во времени. Поэтому, если требуется не только измерить температуру в точке установки терморезистора, но и записать ее изменение во времени, то надо использовать автоматические уравновешенные мосты.

Промышленность выпускает не только одноточечные, но и трехточечные уравновешенные мосты, в частности типа КСМ2, которые снабжены переключающим устройством, включающим в одно из плеч моста поочередно то один, то другой, то третий однотипный терморезистор.

Шкалы автоматических уравновешенных мостов выполняют как начинающиеся с нуля, так и безнулевые и градуируют при сопротивлении основных соединительных проводов 5 Ом, вот почему в два плеча включены подгоночные резисторы $R5$ и $R6$.

20.7. В чем особенность измерения температуры термометром сопротивления в комплекте с магнитоэлектрическим логометром!

В качестве вторичных приборов с термометрами сопротивления широко применяются и магнитоэлектрические логометры.

Для использования логометра в термометрах сопротивления обычно поступают так: последовательно с одной из рамок логометра включают постоянный резистор $R1$, а последовательно с другой рамкой при помощи соединительных проводов включают терморезистор RK (рис. 20.6, а). Уравнение шкалы прибора имеет вид

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_{P2} + R_2 + R_1}{R_{P1} + R_1}\right).$$

Так как для данного прибора R_{P1} , R_{P2} и R_2 — величины постоянные, то отклонение стрелки логометра зависит только от зна-

чения сопротивления терморезистора RK , и шкалу логометра можно отградуировать в градусах Цельсия.

Промышленность выпускает щитовые показывающие логометры типов Л-64, ЛПр-66 и ЛР-64-02, которые предназначены для рабо-

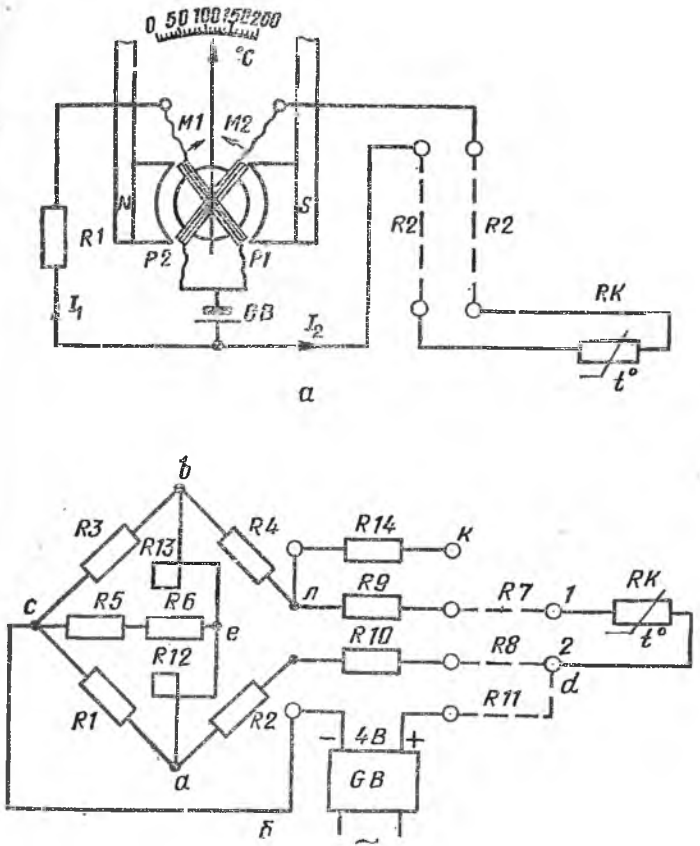


Рис. 20.6. Схема измерения температуры при помощи терморезистора и логометра типа Л-64 (а), электрическая схема логометра типа Л-64 (б).

ты с техническими термометрами сопротивления, подключенными по двух- или трехпроводной схеме. Класс точности приборов 1,5.

С целью повышения чувствительности термометра сопротивления и уменьшения влияния сопротивления соединительных проводов в логометрах Л-64 предусмотрена схема неуравновешенного моста (рис. 20.6, б), выполненного из постоянных резисторов $R1$, $R2$, $R3$ и $R4$. Последовательно с резистором $R4$ включены терморезистор RK , провод линии связи $R7$ и подгоночный резистор $R9$.

Последовательно с резистором R_2 включен подгоночный резистор R_{10} и другой соединительный провод R_8 .

Диагональ питания подключена к выходу источника питания GB , позволяющего получить на выходе постоянное напряжение 4 В. В цепь диагонали питания включен третий соединительный провод R_{11} .

В измерительную диагональ последовательно включены рамки логометра, имеющие сопротивления R_{12} и R_{13} , средняя точка e , соединяющая рамки, через резисторы R_5 и R_6 подключена к точке c моста. Все резисторы в схеме подбирают таким образом, чтобы при среднем значении сопротивления R_t терморезистора RK токи, проходящие через рамки логометра, и вращающие моменты были одинаковы. При этом стрелка прибора занимает на шкале среднее положение.

Если значение сопротивления R_t под действием температуры отклонится от среднего значения, то равенство токов нарушится, изменится их отношение. Новому отношению токов будет соответствовать новое устойчивое положение стрелки логометра, отвечающее значению сопротивления R_t , причем при увеличении R_t , то есть при увеличении температуры, стрелка прибора отклонится вправо от среднего положения, а при уменьшении температуры — влево.

Перед регулировкой необходимо при помощи подгоночных резисторов R_9 и R_{10} установить сопротивление цепи соединительных проводов и подгоночных резисторов равным 5 или 15 Ом. После этого правильность подгонки нужно проверить при помощи контрольного резистора R_{14} . Для этого подгоночный резистор R_9 отключают от точки L и подключают к точке K , затем ставят перемычку между точками 1 и 2 и проверяют положение стрелки гальванометра, оно должно быть на контрольной (красной) отметке, нанесенной обычно посередине шкалы. После этого перемычку убирают, подгоночный резистор R_9 вновь подключают к зажиму L .

20.8. Как использовать диоды и транзисторы для измерения температуры!

В качестве термопреобразователей можно использовать полупроводниковые диоды и транзисторы. Это объясняется тем, что при постоянном значении тока, протекающего в прямом направлении, например через переход диода, напряжение на переходе практически линейно изменяется с изменением температуры. Для того чтобы значение тока было постоянно, последовательно с диодом достаточно включить большое активное сопротивление. При этом ток, проходящий через диод, не должен вызывать его нагрева. Построить градуировочную характеристику такого термодатчика можно по двум точкам — в начале и в конце измеряемого диапазона температур. На рисунке 20.7, а показана схема измерения температуры при помощи диода VD . Источником питания может служить батарейка.

Аналогично влияет температура на сопротивление перехода эмиттер — база транзисторов. При этом транзистор может одновременно действовать и как датчик температуры, и как усилитель собственного сигнала. Поэтому применение транзисторов в качестве термодатчиков имеет преимущество перед диодами. На рисунке 20.7, б показана схема термометра, в которой в качестве преобразователя

температуры используется транзистор (германиевый или кремниевый).

При изготовлении термометров как на диодах, так и на транзисторах требуется построить градуировочную характеристику, при этом в качестве образцового средства измерений можно использовать ртутный термометр.

Инерционность термометров на диодах и транзисторах небольшая: на диоде — 30 с, на транзисторе — 60 с.

Практический интерес представляет мостовая схема с транзистором в одном из плеч (рис. 20.7, в). В этой схеме эмиттерный переход включен в одно из плеч моста R_4 , на коллектор подано неболь-

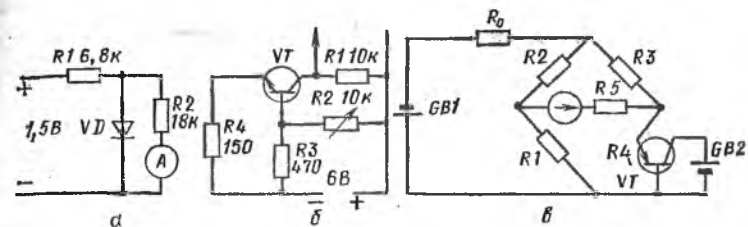


Рис. 20.7. Схема измерения температуры при помощи диода (а) и транзисторов (б, в).

шое запирающее напряжение. Мостовые съемы позволяют увеличивать относительную чувствительность устройства, компенсируя начальное значение сопротивления датчика.

20.9. Как измерить температуру тела животных?

Приборы, используемые для измерения температуры тела животных, должны иметь большую точность, так как небольшое отклонение температуры от нормы свидетельствует о болезни животного. Например, у телят нормальной считается температура 38,7... 38,8 °С, а температура 39,1 °С свидетельствует о болезни. Самый простой способ измерения температуры животных при помощи ртутных термометров неудобен при массовой профилактической проверке из-за большой их инерционности и малой механической прочности.

В Агрофизическом институте (АФИ) разработаны малоинерционные полупроводниковые микротермосопротивления типов МТ-54, МТ-57, МТ-58, МТП-57 и др. Конструктивно они представляют собой стеклянную трубку, на конце которой закреплен полупроводник в форме шарика диаметром от 0,5 до 0,8 мм, в него вмонтированы два электрода из платиновой тонкой проволоки диаметром 0,05 мм. Шарик и электроды покрыты тонким слоем стекла в виде пленки толщиной 50 микрон. На расстоянии 2...3 мм от центра шарика платиновые проволочки при помощи точечной сварки присоединены к никелевым выводным проволочкам диаметром 0,1 мм. Длина стеклянной трубки микротермосопротивления в зависимости от его типа колеблется от 3 до 400 мм. Постоянная времени в спокойном воздухе составляет для микротермосопротивления МТ-54 не более

10 с, для МТ-57-0,05. . .0,2 с, для МТ-58 в воздухе 20. . .30 с, а в воде 2. . .3 с.

Микротермосопротивление может быть смонтировано в специальном держателе, закрепленном на ручке из изоляционного материала, через которую выведен гибкий двухжильный провод, подключающий микротермосопротивление к неуравновешенной мостовой схеме. В зависимости от условий работы длина соединительного провода может достигать нескольких десятков метров.

Принципиальная электрическая схема такого термометра показана на рисунке 20.8. Измерительное устройство построено по схеме неуравновешенного моста, включающего постоянные резисторы R_2 , R_3 и R_4 . При измерении температуры в свободное плечо включают микротермосопротивление, а при контроле — резистор R_1 . Эта схема позволяет наиболее просто, быстро и на расстоянии

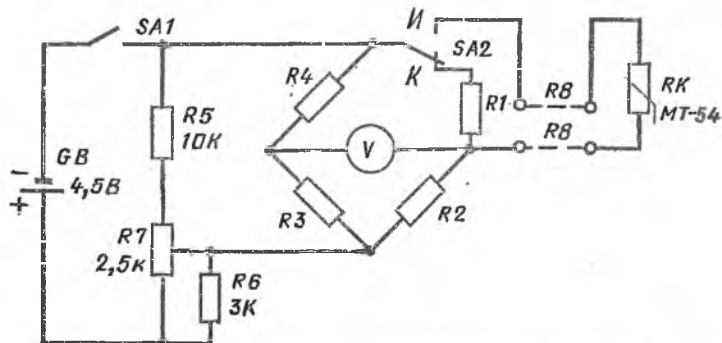


Рис. 20.8. Принципиальная схема термометра типа МТ-54.

измерять температуру тела животных по заранее отградуированной в градусах Цельсия шкале микроамперметра.

Рассмотренные электротермометры требуют контакта с телом животного во время измерения температуры, что при массовом обследовании животных сложно. Поэтому желательно измерять температуру без контакта с телом животного, например пропуская животных по одному через специальный станок или измеряя температуру молока во время доения и т. п.

Повысить чувствительность термометра для измерения температуры тела можно при помощи операционного усилителя (рис. 20.9). В этой схеме датчиком температуры служит малоинерционное микротермосопротивление (500. . .5000 Ом при температуре 20 °С). Ток полного отклонения микроамперметра 100 мкА.

Мостовая схема неуравновешенного моста включает резисторы R_1 , $R_2 + R_3$, R_4 и термистор R_K . Напряжение небаланса моста усиливается операционным усилителем A . Микроамперметр PA включен в цепь отрицательной обратной связи, охватывающей операционный усилитель A . Мост балансируется подбором резисторов R_1 и R_4 при температуре +20 °С. При увеличении температуры сопротивление микротерморезистора уменьшается, мост разбалансируется, на измерительной диагонали моста появляется напряжение

небаланса. Это напряжение усиливается операционным усилителем A и подается на микроамперметр PA . Шкала прибора рассчитана на измерение температуры от $+20$ до $+44$ °C.

Если переключатель $SA1$ установить в положение 2—2', то это вызовет замыкание накоротко резистора $R5$ и повышение коэффициента усиления устройства. Переменным резистором $R3$ можно регулировать напряжение на неинвертирующем выходе A и уста-

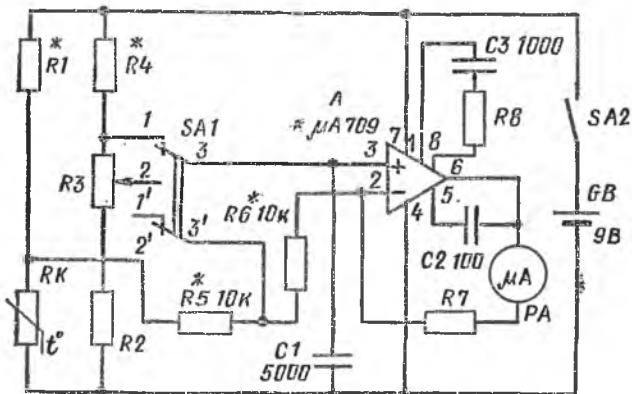


Рис. 20.9. Схема термометра с операционным усилением для измерения температуры тела животных.

навливать стрелку прибора в середину шкалы при требуемой температуре. Такая регулировка позволяет следить за отклонением температуры тела от нормальной на $\pm 2^\circ$.

20.10. Как измерить температуру воздуха в помещении!

В условиях животноводческих помещений применять термометры заводского изготовления с высоким классом точности, а поэтому сравнительно сложные и дорогие, не всегда экономически целесообразно, так как разброс даже оптимальных температур значительно выше допустимых погрешностей промышленных измерительных приборов. Поэтому в практике эксплуатации животноводческих помещений встречаются разнообразные методы и способы измерения температуры воздуха.

Удобно измерять температуру воздуха и записывать ее изменения в диапазоне температур от -35 до $+45$ °C метеорологическим термографом М-16. Термодатчиком в этом приборе служит dilatометрический пластинчатый термометр, в котором изменение температуры вызывает деформацию биметаллической пластинки, передающуюся на стрелку с пером. Перо записывает изменение температуры на диаграммной ленте, укрепленной на синхронно вращающемся барабане. Скорость вращения барабана подбирают равной либо 26 ч, то есть примерно один оборот за сутки (прибор М-16), либо 176 ч, что соответствует недельному заводу (прибор М-16н).

Термограф М-16 позволяет с точностью $\pm 1^\circ$ измерять и записывать температуру в месте его установки. Прибор удобен и прост в эксплуатации, но позволяет контролировать температуру только в одном месте, этого обычно недостаточно, так как очень трудно найти такое место установки прибора, чтобы по его показаниям судить о температурном режиме всего помещения и особенно о температуре в зоне пребывания животных.

Для получения достоверных данных о температуре воздуха в помещении требуется либо устанавливать несколько термометров, что сложно и дорого, либо иметь легкий переносной термометр с малой инерционностью, чтобы за короткое время измерить температуру в наиболее характерных местах помещения, либо стационарно устанавливать в определенных местах помещения только датчики

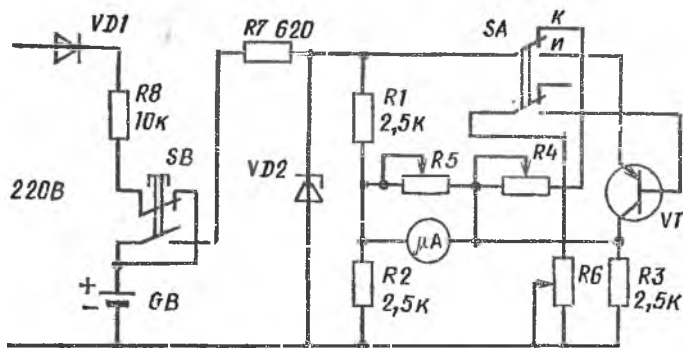


Рис. 20.10. Схема измерения температуры на термотранзисторе.

температуры, выводные провода которых подводятся к месту расположения измерительного прибора с переключающим устройством.

Заслуживает внимания легкий малогабаритный измеритель температуры на транзисторе (рис. 20.10). В качестве датчика температуры используется термотранзистор VT, включенный по схеме с общим эмиттером. Ток коллектора транзистора почти линейно зависит от температуры. С целью улавливания изменения тока коллектора транзистора при изменении температуры используется неуравновешенная мостовая схема, выполненная из трех постоянных резисторов R1, R2, R3 и переменного четвертого в виде внутреннего сопротивления терморезистора.

Принцип работы термометра заключается в следующем. При изменении температуры датчика изменяется ток коллектора транзистора и в измерительной диагонали моста появляется ток, который регистрируется микроамперметром М24 с номинальным значением тока 100 мкА. Шкала прибора близка к линейной. Прибором можно измерять температуру от -60 до $+80^\circ\text{C}$. Показания прибора соответствуют отклонению температуры от заданной. При измеряемой температуре от $+20$ до $+60^\circ\text{C}$ диапазон измерений отклонения температуры составляет 8° , а при измеряемой температуре от -60 до $+20^\circ\text{C}$ диапазон измерений отклонения температуры может быть расширен до 20° .

Питание става осуществляется от аккумуляторной батареи *GB*. Питающее напряжение стабилизировано диодом *VD2*. Для зарядки аккумуляторной батареи в схеме предусмотрены гасящий резистор *R8* и диод *VD1*. Балластный резистор *R8* выбирают таким образом, чтобы исключить разряд аккумуляторной батареи ниже 9 В, так как при этом рабочая точка стабилитрона *VD2* уходит с участка стабилизации, что и обнаруживается в режиме «контроль» по показанию прибора.

Для настройки термометра на требуемый диапазон пользуются переменным резистором *R6*. Резистор *R5* служит для шунтирования измерительного прибора.

Измерение происходит при нажатии кнопки *SB*.

20.11. Как можно измерить температуру пола в животноводческом помещении!

Для измерения температуры полов в животноводческих помещениях можно использовать термометры различных типов, выпускаемые промышленностью и подробно рассмотренные выше,

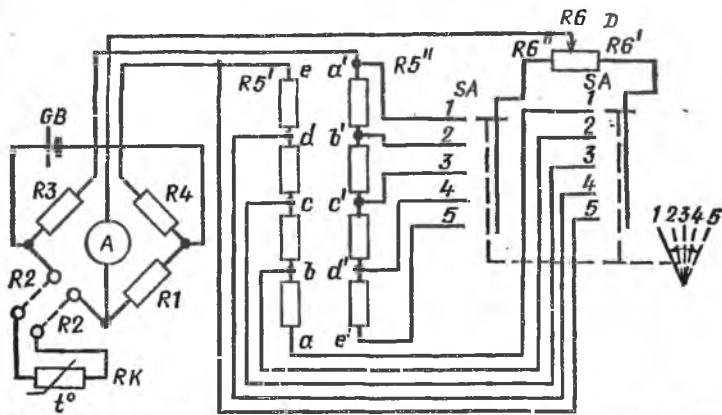


Рис. 20.11. Схема термометра сопротивления с плавным изменением отношения плеч.

Для измерения температуры полов широко используют термометры сопротивления типов ТСП и ТСМ, а также различные полупроводниковые термосопротивления типов ММТ и КМТ.

При электрическом обогреве полов с использованием для обогрева катанки или коаксиальных нагревателей появляется практическая возможность добиться почти равномерной температуры пола как вдоль, так и поперек обогреваемой полосы. В этом случае всегда можно найти такое место для установки датчика, где значение температуры равно средней температуре обогреваемого пола, следовательно, можно воспользоваться одним преобразователем.

На рисунке 20.11 показана схема электротермометра, уравновешенный мост в которой выполнен с постоянным сопротивлением

резистора, включенного в плечо сравнения $R1$, и переменным отношением сопротивлений резисторов плеч, которое можно плавно изменять при помощи двухполюсного переключателя SA и движка D . Причем переключатель SA изменяет отношение сопротивлений резисторов $R5'$ и $R5''$ в пропорции, кратной десяти, а движок D обеспечивает плавное изменение отношений сопротивлений резисторов $R6'$ и $R6''$.

Таким образом, в одно плечо уравновешенного моста оказывается включенным терморезистор RK , в другое — постоянный резистор $R1$, в третье — резисторы $R3 + R5'' + R6''$ и в четвертое — $R4 + R5' + R6'$. Мост при заданной температуре, то есть при постоянном сопротивлении терморезистора RK , уравновешивается.

Параметры сопротивлений ab, bc, cd, de и $a'b', b'c', c'd', d'e'$ подобраны таким образом, что в зависимости от положения ручки переключателя SA можно снимать показания температуры с точностью до 1° , а в зависимости от положения движка D — снимать показания с точностью до $0,1^\circ$.

Такая система отсчета упрощает и повышает точность измерения, а также устраняет субъективную погрешность оператора.

20.12. Как измерить температуру воды, молока и других жидкостей?

В сельскохозяйственном производстве часто возникает необходимость в измерении температуры жидкостей, например воды, молока и т. п.

Если требуется измерить температуру воды или молока в нескольких удаленных друг от друга местах, то удобно пользоваться легким переносным или многоканальным термометром.

Рассмотрим конструкцию электронного термометра, в качестве датчиков температуры у которого использовано заданное число транзисторов, установленных стационарно в контролируемых местах (рис. 20.12). Прибор включает неуравновешенный мост, состоящий из постоянных резисторов $R1, R3$ и $R5$ и сопротивления участка эмиттер — коллектор одного из транзисторов $VT1$ или $VT2$ в зависимости от положения переключателя $SA1$ (для простоты на схеме показаны только два датчика). Напряжение на мост подается от одного элемента 322. С целью уменьшения влияния питающего напряжения на результат измерения в схеме установлен делитель напряжения из постоянного $R8$ и переменного $R7$ резисторов. При помощи последнего перед измерением устанавливается требуемое напряжение, для чего переключатель $SA2$ ставят в положение «питание».

В качестве вторичного измерительного прибора можно использовать микроамперметры на 100...150 мкА или комбинированные приборы типа Ц4313, Ц435, работающие в режиме измерения постоянного тока на пределе 120 мкА.

Электронный термометр, показанный на рисунке, позволяет измерять температуру в двух диапазонах: от -18 до $+42^\circ\text{C}$ и от -50 до $+10^\circ\text{C}$. Если необходимо, то эти диапазоны можно сместить в ту или иную сторону при сохранении указанного перекрытия по температуре.

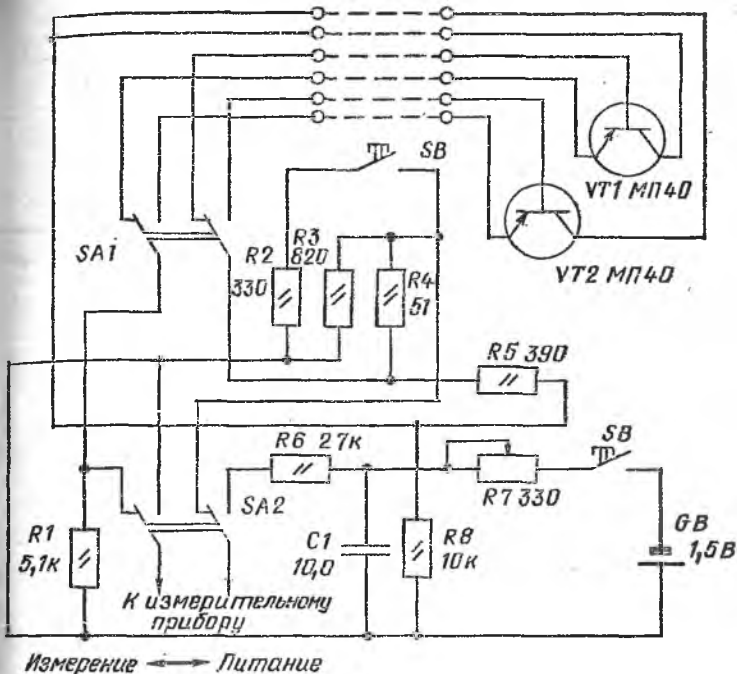


Рис. 20.12. Принципиальная схема электрического термометра для измерения температуры в нескольких точках.

Путем последовательного включения транзисторов $VT1$, $VT2$ и т. д. к измерительной цепи при помощи переключателя $SA1$ можно измерять температуру воды или молока в различных точках.

Этот же электронный термометр можно также использовать для измерения температуры воздуха или пола в различных местах помещения.

20.13. Как измерить температуру сена и силоса!

Температуру сена или силоса при его хранении можно измерять самыми простыми термометрами, датчиками температуры которых являются полупроводниковые резисторы, включенные в одно из плеч неуравновешенного моста (рис. 20.4). Терморезистор помещают в наконечник щупа, изготовленный из материала, хорошо проводящего тепло, а за ним устанавливают втулку из теплоизолирующего материала, через которую выводят соединительные провода. Можно применять и многие другие термометры.

20.14. Как измерить температуру почвы!

Чтобы определить оптимальные сроки посева сельскохозяйственных культур, своевременно провести определенные агротехнические, тепломелиоративные мероприятия и по возможности ликвидировать вредные термические воздействия как в открытом, так и в закрытом грунте, необходимо постоянно измерять температуру.

Для быстрого измерения температуры пахотного слоя почвы в качестве датчика температуры может быть использован полупроводниковый резистор ММТ-6 (ММТ-4), заключенный в защитный чехол цилиндрической формы, изготовленный из латуни. Чехол укреплен в изоляционном наконечнике из текстолита, который привинчен к металлической трубке, на наружной поверхности последней нанесены сантиметровые деления для определения глубины

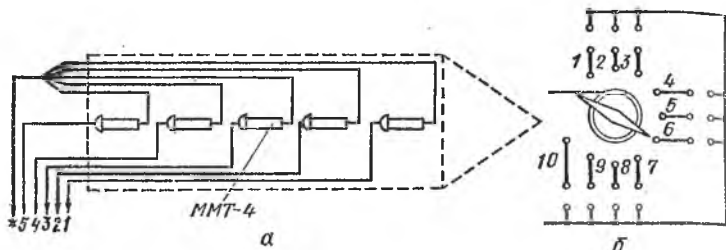


Рис. 20.13. Прибор для измерения температуры почвы:

а — схема соединения терморезисторов в штанговом стержне; б — схема переключателя термометров сопротивления.

погружения датчика в почву. Для защиты датчика от ударов о камни при его погружении на изоляционный наконечник навинчен стальной заостренный охранный наконечник. На другом конце трубки укреплен рукоятка из пластмассы, удобная для погружения датчика в почву.

Измерительное устройство может представлять собой мостовую схему, работающую в неуравновешенном режиме, рассчитанную для измерения температуры в диапазоне от 0 до $+50^{\circ}\text{C}$ с точностью до $\pm 0,75^{\circ}$.

В Агрофизическом институте разработан штанговый полупроводниковый термометр, предназначенный для дистанционного стационарного измерения температуры почвы на пяти фиксированных глубинах — 5, 10, 20, 50 и 100 см по одной вертикали. Диапазон измеряемых температур от -20 до $+40^{\circ}\text{C}$ с погрешностью измерений $\pm 0,2^{\circ}$.

Штанговый полупроводниковый многоточечный датчик состоит из свинченных в одну штангу пластмассовых трубок диаметром 20 мм и пяти соединительных пластмассовых втулок, на которых укреплены латунные кольца. Внутри колец установлены терморезисторы ММТ-4.

Принципиальная схема соединения терморезисторов в штанговом стержне приведена на рисунке 20.13, а. Из стержня выведен один общий провод, отмеченный звездочкой, и пять выводов от терморезисторов.

Измерительное устройство представляет собой схему неуравновешенного моста, к которой поочередно подключаются термосопротивления при помощи специального переключателя. Принцип

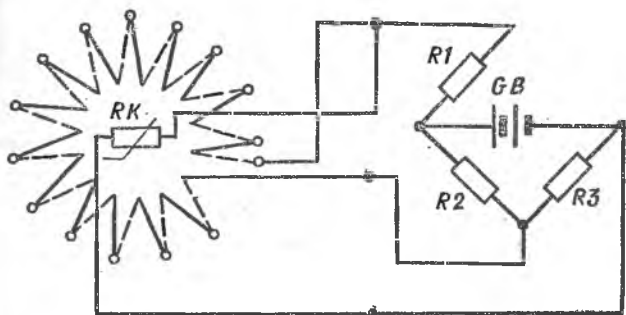


Рис. 20.14. Схема прибора для измерения средней температуры почвы.

работы такого переключателя хорошо виден из рисунка 20.13, б, где цифрами указаны номера подключаемых датчиков температуры.

Чтобы точно определить среднюю температуру почвы на участке площадью 1 м², можно использовать прибор, приведенный на

20.1. Техническая характеристика электротермометров

Тип электротермометра	Назначение прибора, область применения	Диапазон температур, °С	Тип термоэлектробразователя	Погрешность измерения, град.
ЭТП-58	Измерение температуры почвы на глубине 0,3...0,5 м	0...50	Терморезистор ММТ	±1,5
ПИТГ-1	Измерение температуры почвы, замер глубины вспашки и заделки семян	0...30	Термометр сопротивления	±1
АМ-29	Дистанционное измерение температуры почвы на 10 глубинах в диапазоне от 2 до 320 см на расстоянии до 120 м	-40...+60	Десять термометров сопротивления	±1

рисунке 20.14. Преобразователем температуры в приборе служат шестнадцать последовательно соединенных медно-константановых термопар, точки спаивания которых равномерно расположены по окружности в некоторых точках земли и прижаты к ней при помощи специального проволочного держателя. Свободные концы всех термопар расположены в тонких каналах массивного алюминиевого диска

и практически приобретают его температуру, как правило, равную температуре окружающей среды. Для компенсации влияния температуры свободных концов в середине диска расположен терморезистор R_K , включенный в плечо компенсационной мостовой схемы, выполненной из резисторов R_1 , R_2 и R_3 .

Можно измерить температуру почвы и многими термометрами, рассмотренными выше. Выпускаемые промышленностью электротермометры приведены в таблице 20.1.

Глава 21. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ

21.1. Какие электрические методы измерения влажности твердых, сыпучих и жидких веществ получили распространение в агропромышленном комплексе?

Для измерения влажности используют следующие электрические методы: кондуктометрический, по диэлектрическим потерям, диэлькометрический, магнитоядерного резонанса и радиационные (редко).

Кондуктометрический метод основан на зависимости удельной объемной проводимости, измеренной на постоянном токе, от содержания влаги. Чувствительность метода непостоянна, при малой влажности она значительно выше, чем при большой. На результат измерения оказывают влияние такие факторы измеряемой среды, как вязкость, концентрация электролита, температура. Поэтому данный метод имеет погрешность 6. . 8 %. Кондуктометрический метод нашел применение при измерении влажности зерна, волокон, почв, некоторых пищевых продуктов и т. п.

Метод диэлектрических потерь основан на том, что диэлектрические потери составляют часть электрической энергии, переходящей в теплоту в веществе при переменном напряжении. Причем эти потери будут пропорциональны относительному количеству воды в пробе тем больше, чем выше частота f приложенного напряжения. Для определения влажности материала необходимо измерять диэлектрические потери. Этот метод измерения влажности требует наличия источника повышенной частоты напряжения. Точность измерения влажности в этом методе зависит от физической структуры, вязкости, температуры и т. п., поэтому он не нашел широкого распространения.

Диэлькометрический метод измерения влажности основан на том, что диэлектрическая проницаемость вещества является линейной функцией влагосодержания, выраженного в процентах. Так как диэлектрическая проницаемость сухого вещества для большинства материалов обычно составляет 2. . 5, а воды — 81, то, следовательно, даже небольшое количество воды в веществе приводит к существенным изменениям его диэлектрической проницаемости. Это изменение обычно измеряют через емкость конденсаторного датчика, заполненного исследуемым веществом.

Для измерения значения емкости может быть применена мостовая измерительная схема. Однако наличие диэлектрических потерь в реальном веществе приводит к необходимости уравнивания

ния моста по параметрам C_x и R_x (шунтирующих емкости и сопротивления), что трудно осуществимо в промышленных автоматических устройствах.

Метод ядерного магнитного резонанса основан на свойстве поглощения энергии радиочастотного магнитного поля ядрами атомов водорода воды, содержащейся в материале.

Интенсивность поглощения энергии при ядерном магнитном резонансе пропорциональна числу ядер атомов водорода, находящихся в единице объема исследуемого вещества, поэтому возможно однозначное определение влагосодержания в любом продукте независимо от степени проводимости и значения диэлектрических потерь.

21.2. Какими методами и средствами измерений можно измерить влажность зерна и других сыпучих материалов?

Для быстрого измерения влажности сельскохозяйственных культур (пшеницы, ржи, ячменя и др.) в условиях колхозов и совхозов можно применять электронно-цифровой влагомер зерна типа «Колос-1». Прибор обеспечивает измерение влажности от 8 до 35 %, дискретность отсчета 0,1 %. Результаты измерений снимают с индикатора в относительных единицах, затем по таблицам, прилагаемым к влагомеру, определяют значения влажности в процентах.

Массу контролируемого продукта определяют по встроенному во влагомер автоматическому весовому устройству. Средняя продолжительность одного измерения 60 с. Питание к прибору подается от батарейки «Крона». Масса влагомера 1,5 кг.

Во влагомере используется диэлькометрический метод измерения влажности нормированного количества зерна (200 г). При этом отдельно преобразуются диэлектрическая проницаемость влажного зерна в частоту и активная проводимость — в амплитуду выходного сигнала. Диэлектрическая проницаемость зерна определяется в основном его влажностью, а активная проводимость зависит также от сорта, района и условий проращивания культуры. На диэлектрическую проницаемость значительно влияет и температура. Поэтому многопараметрическое преобразование позволяет учесть температуру и специфику измеряемого зерна и автоматически скорректировать результат измерений.

Влагомер «Колос-1» состоит из цифрового преобразователя с бункером, весовым устройством, платой преобразователей, платой индикации и батарейей, а также кожуха и засыпного стакана.

Датчик состоит из двух цилиндрических концентрических электродов, закрепленных на основании из диэлектрика. Центральный электрод в верхней части снабжен конусной насадкой для равномерного распределения зерна. Датчик представляет собой подвижную часть весового устройства, выполненного так, что при массе зерна, равной 201 ± 1 г, двигаясь вниз, он включает контакты, и влагомер получает электропитание.

Для удобства переноса влагомер снабжен ремнем и крышкой, на которой помещена градуировочная таблица для перевода показаний влагомера в абсолютные проценты влажности зерна.

Влагомер рекомендуется применять: для определения начала и окончания комбайнирования; для контроля влажности зерна во

время хранения и сушки; для контроля влажности семенного материала; для выходного контроля влажности зерна при его отправке на заготовительные пункты и т. п.

Для быстрого измерения влажности зерна в полевых и стационарных установках промышленность выпускает также портативные экспресс-влажмеры типов ПВЗ-10Д для измерения влажности зерна в поле, на складе или в лаборатории и ПВЗ-20Д — стационарный поточный влагомер для непрерывного контроля и автоматизации технологического процесса сушки зерна (в комплекте зерносушилок). Принцип их действия основан на измерении на частоте 11 МГц электрической емкости преобразователя, заполненного зерном. В обоих приборах применены измерительные схемы с емкостным мостом и емкостные измерительные преобразователи с однородной структурой поля и изолированным высокопотенциальным электродом. При влажности до 25 % активная составляющая проводимости зерна на результаты измерения не влияет. Приборы созданы на базе полупроводниковых элементов и максимально унифицированы.

Серийный экспресс-влажмер ПВЗ-10Д предназначен для измерения влажности пшеницы, ржи, ячменя, овса, кукурузы, риса, проса, гороха, люпина и имеет следующие технические данные: продолжительность однократного измерения, включая все подготовительные операции, не более 2 мин; относительная погрешность однократного измерения влажности зерна в диапазоне 10...17 % не более 1 %; 17...25 % — 1,5 %; 25...30 % — 2%; свыше 30 % — 2,5 %; масса навески зерна 100 (60) ± 0,4 г; питание от батарей (ток не более 10 мА) или от сети переменного тока с напряжением 220 В. Габарит прибора 135 × 155 × 220 мм, масса 3,5 кг.

Стационарный поточный влагомер зерна ПВЗ-20Д предназначен для контроля за рабочим процессом в зерносушилках и его автоматизации. Влагомер состоит из виброустойчивого и пылезащищенного блока, устанавливаемого в разрыв вертикального зернопровода, и дистанционного блока индикации и автоматики, располагаемого на пульте управления зерносушильного агрегата. Технические данные влагомера следующие: относительная погрешность измерения влажности зерна в диапазоне 10...18 % не более ± 1,5%; 18...20 % — ± 2,0 %; цена деления индикатора влажности 0,2 %; прибор нормально работает в условиях измерения расхода от 2 до 25 т/ч при температуре зерна от 5 до 60 °С, масса блока преобразователя около 7,5 кг.

На том же принципе действия основана работа влагомеров зерна, технические характеристики которых приведены в таблице 21.1.

Для измерения влажности зерна может быть применен измеритель влажности сыпучих материалов с индуктивно-емкостным преобразователем. Принцип работы такого влагомера основан на многопараметрическом методе измерения. Он заключается в том, что с целью компенсации погрешностей, вызываемых нестабильностью характеристик влагомера и их взаимозависимостью, измеряют несколько параметров материала. Например, при одинаковой влажности двух проб различного материала, помещенных между обкладками конденсатора, ток через них течет разный, так как сами пробы обладают разным диэлектрическими потерями. Поэтому при измерении влажности должно быть учтено несколько параметров материала. Вычитая и складывая сигналы от нескольких

21.1. Техническая характеристика приборов для измерения влажности зерна

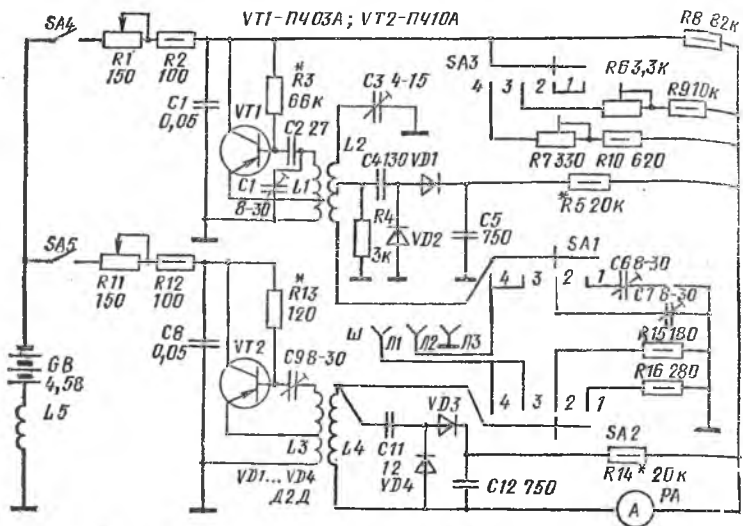
Тип	Назначение	Диапазон измерений влажности, %	Погрешность измерения, %	Источник питания
АВЗК-1	Измерение и регистрация влажности зерна пшеницы	10...30	При влажности до 17% — ± 1 , свыше 17% — $\pm 1,5$	Сеть переменного тока 220 В, 50 Гц
АВЗУК-1	Непрерывное измерение влажности зерна в потоке с записью результата измерения применяется в системах автоматического регулирования зерносушилок	10...30	Свыше 17% — $\pm 1,5$, до 17% — ± 1	То же
ИВЗ	Определение влажности зерна в лабораторных условиях	Пшеница и рожь 10...35, ячмень 11...35, рис 12...35	В диапазоне до 18% — $\pm 1,8$, свыше 18% — ± 2	Аккумулятор 12 В
ВЗПК-1	Экспресс-измерение влажности зерновых культур в полевых условиях при уборке, обработке, хранении и подготовке семенного материала	2...40	В диапазоне от 10 до 18% — $\pm 1,5$, от 8 до 10 и свыше 18% — $\pm 2,0$	Аккумулятор 9 В
Нива-1 (с цифровым индикатором)	Экспресс-измерение влажности зерна и семян в полевых условиях	До 40	В диапазоне от 10 до 18% — $\pm 1,5$, от 8 до 10 и свыше 18% — $\pm 2,2$	То же

датчиков, можно получить сигнал, пропорциональный только влажности испытываемого материала.

Влагомер состоит из индуктивно-емкостного датчика, двух генераторов высокой частоты, двух измерительных узлов, двух выпрямителей и измерительного прибора.

Принципиальная схема влагомера показана на рисунке 21.1, а. Один генератор высокой частоты выполнен на транзисторе VT1 по обычной схеме и вырабатывает сигнал частотой 6 МГц. Сигнал генератора через обмотку L2 поступает в одну из диагоналей индуктивно-емкостного моста, образованного половинками обмотки катушки L2, конденсатором C3 и в зависимости от положения переключателя SA1 конденсаторами C6, C7 или емкостным датчиком.

В другую диагональ моста включен резистор R_4 , с которого напряжение разбаланса подается через конденсатор C_4 на выпрямитель, собранный по схеме удвоения напряжения на диодах VD_1 и VD_2 . Нагрузкой выпрямителя служат конденсатор C_5 , резистор R_5 и измерительный прибор PA . Чтобы проверить показания прибора в начале и в конце шкалы, вместо емкостного датчика подключают



а

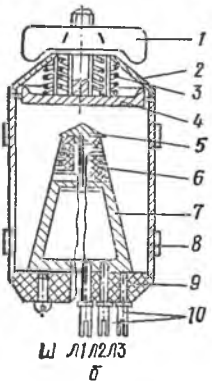


Рис. 21.1. Принципиальная схема измерителя влажности с индуктивно-емкостным преобразователем (а) и устройство индуктивно-емкостного преобразователя (б).

эталонные конденсаторы C_6 и C_7 (положения 1 и 2 переключателя SA_1). Чувствительность емкостного датчика регулируют резистором R_1 . В положениях 3 и 4 переключателя SA_1 измеряют влажность соответственно на первом и втором диапазонах.

Второй генератор высокой частоты выполнен на транзисторе VT_2 по той же схеме и вырабатывает сигнал частотой 50 МГц. Контур генератора через обмотку L_4 связан с индуктивным дат-

чиком (в положениях 3 и 4 переключателя SA2). С катушки L4 через конденсатор C11 сигнал поступает на второй выпрямитель, выполненный на диодах VD3, VD4 также по схеме удвоения. Нагрузкой выпрямителя являются конденсатор C12, резистор R14 и измерительный прибор PA. Индуктивный датчик прибора влияет на добротность контура генератора, а следовательно, на амплитуду напряжения генерируемых колебаний. Резисторы R16, R15 используются так же, как и конденсаторы C6 и C7 при контроле отсчета прибора в начале и конце шкалы соответственно. Чувствительность индуктивного датчика регулируют резистором R11. Резисторы R6...R10 необходимы для установки стрелки измерительного прибора на начало или конец шкалы при измерении влажности эталонных проб во время градуировки прибора.

Индуктивно-емкостный датчик (рис. 21.1, б) представляет собой металлический стакан диаметром 60 мм, высотой 110 мм с системой электродов, в котором исследуемый материал сжимается при помощи пружинного устройства. Система электродов емкостного датчика образована корпусом 8, крышкой 2 с размещенным в ней поршнем 4, который перемещается винтом 1 и пружинами 3, основным 7 и компенсирующим 5 электродами, которые с катушкой 6 индуктивного датчика закреплены на изолирующей прокладке 9. Штупсели 10 необходимы для соединения датчика влажности с влагомером. Компенсирующий электрод служит для стабилизации показаний, меняющихся в зависимости от количества исследуемого материала или его плотности за счет изменения расстояния между поршнем и этим электродом. Для получения линейной шкалы влагомера компенсирующий электрод 5 и нижнюю часть основного электрода 7 (примерно 2/3) покрывают лаком УВЛ-3. Площадь покрытия основного электрода подбирают экспериментально. Емкость датчика в незаполненном состоянии составляет 3,2 пФ.

Во влагомере использован измерительный прибор M265 с пределом измерения 100 мкА.

Двухчастотный влагомер предназначен для измерения влажности сыпучих материалов (например, зерна) непосредственно на месте отбора проб. Пределы измерений прибора составляют 10...30 % в двух диапазонах. Погрешность измерений на первом диапазоне (10...20 %) не более 0,4 %, а на втором (20...30 %) — не более 0,5 %.

С влагомером можно работать в помещениях при температуре окружающего воздуха +10...35 °С и относительной влажности до 20 %.

21.3. Как измерить влажность кормов и кормосмесей?

Промышленность выпускает электронно-цифровой влагомер «Нива-2» для кормовых (сено-соломистых) материалов и фуражного зерна, обеспечивающий высокую скорость измерения естественной влажности кормов в диапазоне от 10 до 70 %. Абсолютная погрешность измерения $\pm 2...4$ %.

Результат измерения выражен в цифровой форме. Предварительно необходимо построить градуировочную характеристику прибора для конкретной культуры, затем проводить измерения. Прин-

цип действия прибора основан на диэлькометрическом методе измерения влажности.

Промышленность выпускает также электронно-цифровой влагомер типа ВЛК-01, предназначенный для быстрого измерения естественной влажности зеленой массы (ячменя, риса, овса, кукурузы и др.), сенажа, сена, фуражного зерна. Принцип действия основан на диэлькометрическом методе измерения влажности. Показания прибора выражены в цифровой форме. Диапазон измерений влажности зеленой массы 20. . .70 %, сена 14. . .40 %, фуражного зерна 10. . .40 %, абсолютная погрешность измерений от ± 4 до ± 2 %. Продолжительность определения влажности 1 мин.

Для быстрого измерения влажности травяной муки можно воспользоваться влагомером типа ВТМ-1М, имеющим диапазон измерений влажности от 4 до 15 %, абсолютную погрешность измерений $\pm 1\%$.

21.4. Как измерить влажность воздуха и газов!

Методы измерения. Наибольшее распространение получили следующие гигрометрические методы измерения влажности воздуха.

Психрометрический метод основан на измерении температур двумя термометрами: «сухим» (обыкновенным) и «мокрым», имеющим резервуар, смоченный водой и находящийся в термодинамическом равновесии с окружающей газовой средой. Испарение с поверхности резервуара мокрого термометра происходит тем интенсивнее, чем ниже влажность газа; разность показаний сухого и мокрого термометров зависит, следовательно, от значения влажности.

Метод точки росы заключается в определении температуры, до которой необходимо охладить (при неизменном давлении) ненасыщенный газ для того, чтобы довести его до состояния насыщения. Практически температуру точки росы определяют по началу конденсации водяного пара на поверхности охлаждаемого твердого тела (металлического зеркала и т. п.). Определив эту температуру, по соответствующим таблицам находят относительную влажность.

Метод определения влажности при помощи сорбционных гигрометров деформационного типа основан на использовании свойств некоторых гигроскопических твердых материалов изменять свои линейные размеры в функции влажности окружающего воздуха.

Метод определения влажности при помощи электрических гигрометров, основанный на использовании свойства некоторых материалов изменять свои электрические параметры в зависимости от влажности окружающей среды.

Психрометрический метод. Принцип действия электрических влагомеров, работа которых основана на психрометрическом методе, поясним на примере схемы по рисунку 21.2, а.

Существенное преимущество этого прибора заключается в том, что по нему можно непосредственно отсчитывать относительную влажность без психрометрических таблиц. Электрическая схема представляет собой неуравновешенный мост с тремя полупроводниковыми резисторами: RK_c (сухой терморезистор), RK_m (смоченный терморезистор) и RK_k (компенсационный терморезистор). Смоченный терморезистор обвязан батистовым чулком, конец которого опущен в бачок с водой. Смачивание происходит автоматически.

Аспирация, то есть засасывание воздуха, который обтекает чувствительные элементы термометров, предусмотрена также автоматическая, при помощи моторчика, питаемого постоянным током напряжением 24 В. Оба терморезистора закрыты чехлами, расположе-

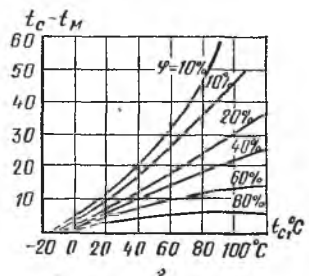
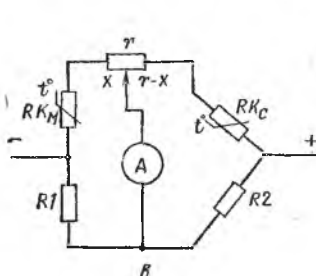
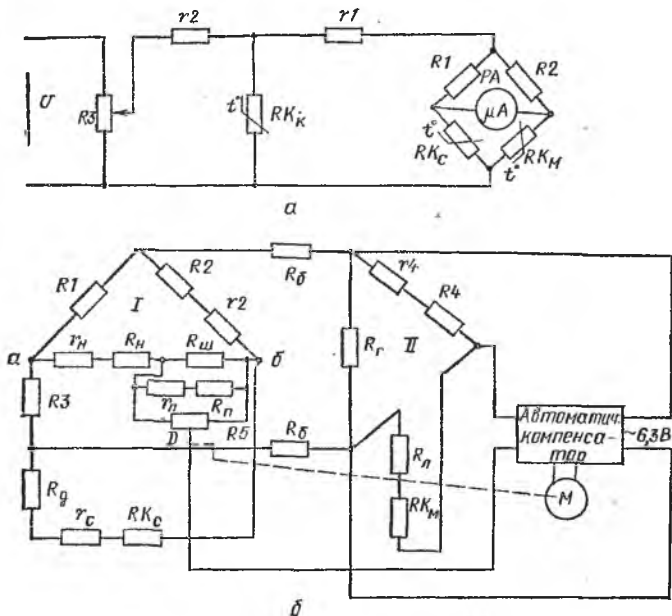


Рис. 21.2. Полупроводниковые электрические психрометры ППК-АФИ (а) и ПЭ (б). Схема измерения психрометрической разности $t_c - t_m$ (в) и зависимость $t_c - t_m = f(t_c)$ с параметром φ (з).

ны горизонтально и вместе с моторчиком образуют отдельный выносной блок, что позволяет измерять влажность дистанционно и в тонком слое воздуха.

Терморезисторы RK_c и RK_m , номинальное сопротивление и температурный коэффициент которых одинаковы, включены в два

21.2. Техническая характеристика приборов для измерения влажности воздуха и газов

Тип прибора	Назначение прибора	Диапазон измерений влажности, %	Абсолютная погрешность измерений, %	Тип первичного преобразователя и вторичного прибора
<i>Влагомеры психрометрические</i>				
ВВ4	Измерение, регистрация и регулирование (в составе САР) относительной влажности воздуха и неагрессивных газов в 3, 6 или 12 точках	20...80 40...90	±3	ДИВ4, ДИВТ2 с термометрами сопротивления и самопишущий прибор КСМ4
Комплекс аппаратуры для измерения относительной влажности воздуха	Непрерывное преобразование сигналов первичных преобразователей влажности в унифицированные сигналы постоянного тока 0...5 мА или напряжения 0...10 В	20...80 40...90	±3 для датчика; ±1 для преобразователя	ДИВ4 и преобразователь А280
<i>Влагомеры сорбционные</i>				
ГС-210	Непрерывное измерение относительной влажности паровоздушных смесей, может быть использован в системах автоматического регулирования	19...98	±3	Электрический сорбционный датчик и самопишущий прибор
Гигрограф М-21	Регистрация и измерения относительной влажности воздуха (М-21С — суточный; М-21Н — недельный)	30...100	При записи времени ±5; ±30	Сорбционный датчик деформационного типа и самопишущий прибор с часовым механизмом
«Волна-2»	Измерение относительной влажности воздуха в сельскохозяйственных помещениях	0...100	±2	Пьезоэлемент, покрытый пленкой сорбента, и самопишущий прибор КСП2
«Волна-1»	Измерение относительной влажности воздуха и газовых смесей	0...100	±1,5	То же

Метод точки росы — один из основных методов автоматического контроля влажности воздуха и других газов.

Достоинства гигрометров точки росы: большие пределы измерений в широком диапазоне температур (100 °С и ниже) и давлений, удовлетворительная точность во всем диапазоне измерений.

Измерение температуры точки росы сводится к выполнению следующих операций: 1) понижению температуры поверхности зеркала; 2) фиксации момента возникновения конденсата (в виде росы или льда) на рабочей поверхности зеркала; 3) измерению температуры этой поверхности.

Степень автоматизации перечисленных операций определяет тип гигрометра. В неавтоматических гигрометрах все операции выполняет человек. Полуавтоматические гигрометры характеризуются тем, что одна или две из перечисленных операций выполняются автоматически. В автоматических приборах автоматизированы

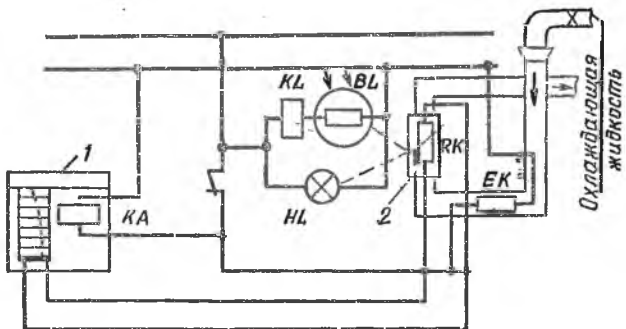


Рис. 21.3. Схема устройства прибора для измерения влажности методом точки росы.

все операции, связанные с процессом измерения. Первые два типа относятся к приборам дискретного действия, третий — к гигрометрам, предназначенным для непрерывного измерения и регулирования.

Зная температуру точки росы τ и температуру исследуемого газа t ($t \geq \tau$), можно определить его относительную влажность

$$\varphi = E_{\tau} / E_t,$$

где E_{τ} — упругость насыщенного пара при температуре τ ;

E_t — упругость насыщенного пара при температуре t .

Рассмотрим принципиальную схему автоматического гигрометра с фотоэлектрическим индикатором появления конденсата (рис. 21.3). В приборе установлен полый полированный цилиндр 2 из нержавеющей стали, который служит для наблюдения точки росы. Цилиндр помещен в среду газа, влажность которого измеряется. Через внутреннюю полость цилиндра непрерывно протекает охлаждающая жидкость, температуру которой можно регулировать электрическим нагревателем EK. Включается электрический нагреватель от электромагнитного реле KL, по обмотке которого протекает

фототок фотоэлемента *ВЛ*. Фотоэлемент освещается отраженным от зеркальной поверхности цилиндра 2 световым потоком лампы накаливания *НЛ*. Если температура зеркала, то есть стенок цилиндра 2, понижается до точки росы, то появляющийся на поверхности зеркала туман уменьшает световой поток, падающий на фотоэлемент. Фототок уменьшается (примерно в 2 раза) и реле срабатывает, замыкая цепь нагревателя *ЕК*. Температура охлаждающей жидкости повышается через некоторый промежуток времени выше точки росы, туман на зеркальце исчезает, фототок возрастает и реле выключает нагреватель, после чего снова зеркало охлаждается до точки росы и т. д. Таким образом, температура зеркального цилиндра непрерывно колеблется около точки росы; соответствующим выбором теплоемкости цилиндра 5 и расхода охлаждающей воды, а также мощности нагревателя можно сделать колебания температуры цилиндра 5 достаточно малыми.

Внутри цилиндра в хорошем тепловом контакте с его стенками помещен термопреобразователь *РК* (или термонара), измеряющий температуру цилиндра, то есть точку росы. Указателем является самопишущий прибор 1 с точечной записью (с падающей дугой). Реле 2, управляющее перемещением (падением) дуги, в свою очередь, управляется реле 3, чем достигается синхронизация записи с моментом появления тумана.

По аналогичной схеме построены другие автоматические гигрометры точки росы с различными способами нагрева и охлаждения зеркала (табл. 21.2).

Метод сорбционных гигрометров деформационного типа. Из приборов, основанных на методе определения влажности при помощи сорбционных гигрометров деформационного типа, очень удобен в эксплуатации самопишущий метеорологический гигрограф М-21, предназначенный для записи относительной влажности воздуха.

Прибор изготавливается двух типов: суточный М-21С с продолжительностью одного оборота барабана часового механизма 26 ч и недельный М-21Н (176 ч).

Принцип действия прибора основан на свойстве обезжиренного человеческого волоса изменять свою длину в зависимости от влажности окружающего воздуха. Это изменение преобразуется при помощи передаточного механизма в перемещение стрелки с пером по образующей барабана (при увеличении длины — вверх, при уменьшении — вниз).

Концы пучка заделаны в эбонитовые втулки, укрепленные в кронштейне. Пучок при помощи крючка соединен с осью, на которой укреплен большая дуга. Цилиндрический противовес удерживает пучок в натянутом состоянии. Для записи на барабан надевают специальную диаграммную ленту. Она разделена горизонтальными параллельными линиями с ценой деления 2 % относительной влажности воздуха и вертикальными дугообразными линиями с ценой деления, соответствующей 15 мин времени оборота для суточного и 2 ч — недельного гигрографа.

Барабан вращается от часового механизма (недельный МЧН, суточный — МЧС), который помещен внутри барабана и поворачивается вместе с ним вокруг центральной оси, неподвижно закрепленной на плите прибора.

Прибор снабжен ключом для завода часового механизма и приспособлением — отметчиком, дающим возможность, не открывая

крышки, делать на диаграммной ленте отметки (засечки) времени наблюдений. Для этого слегка нажимают кнопку отметчика, находящегося на торцевой стенке корпуса прибора. Перо стрелки устанавливают на требуемое деление диаграммной ленты регулировочным винтом.

Прибор записывает изменения относительной влажности воздуха от 30 до 100 %. Общая чувствительность гигрографа, то есть изменение его показаний в интервале от 100 до 30 % и от 30 до 100 %, не более 10 %, изменение влажности по аспирационному психрометру — в том же интервале.

Метод электрических гигрометров. Для измерения влажности в агропромышленном комплексе нашли широкое применение приборы с электронными гигрометрическими датчиками (ЭГД), имеющими чувствительный элемент, выполненный из гигроскопического материала, который при измерениях влажности находится в гидротермическом равновесии с контролируемым газом. Выходной величиной ЭГД является тот или иной электрический параметр влаговчувствительного элемента. Эти датчики могут работать как в неподвижном газе, так и при изменении его скорости в широких пределах, не требуют применения подводющих коммуникаций, кроме кулонометрических, регуляторов расхода или давления газа. Благодаря возможности миниатюризации ЭГД можно применять для измерения влажности очень малых объемов газа. К достоинствам ЭГД относятся также простота конструкции, возможность дистанционных измерений, низкая стоимость, малые габарит и масса.

Основной недостаток многих ЭГД — их старение в процессе эксплуатации или хранения.

Электрические гигрометрические датчики принято делить на электролитические, сорбционные и кулонометрические.

Электролитические датчики состоят из жидкой или сухой пленки электролита, которая поглощает влагу из окружающей среды до тех пор, пока давление пара над поверхностью образующегося раствора не достигнет равновесия с давлением водяного пара окружающей среды. Дальнейшее изменение влажности среды в зависимости от знака этого изменения вызовет поглощение влаги чувствительным элементом или испарение ее до достижения нового состояния.

В зависимости от влажности окружающего газа изменяется сопротивление электролитической пленки R_x , которое, в свою очередь, зависит еще от температуры и концентрации растворенного вещества. Как правило, эти зависимости нелинейны, поэтому электролитические ЭГД градуируют опытным путем. Примером такого датчика может служить преобразователь типа ЭВ4, имеющий диапазон контролирования влажности от 35 до 80 или от 60 до 90 %. Инерционность датчика 5 мин. Основная погрешность 3...5 %. Он позволяет измерять влажность на расстоянии до 600 м.

Существует большое число разнообразных чувствительных элементов, из которых для примера можно выделить хлористо-литиевый гигрометрический датчик с гребенкообразными электродами (рис. 21.4, а), зависимость сопротивления которого от влажности воздуха показана на рисунке 21.4, б. Из графика видно, что он может работать в диапазоне температур от -40 до $+40$ °С. Инерционность таких датчиков 1...2 мин.

Промышленность выпускает преобразователи типов ДЭС-1 и ДИВ. Преобразователь ДЭС-1 работает в диапазоне температур

20...40 °С, диапазон измерений влажности 50...90 % с погрешностью $\pm 3\%$. Он имеет довольно большую инерционность — до 10 мин, чувствителен к запыленности воздуха, параметры его нестабильны во времени.

Преобразователь ДИВ-2 реагирует на изменение влажности воздуха от 20 до 90 % с основной погрешностью $\pm 3,5\%$, постоянная времени 20 мин. Обычно этот датчик служит чувствительным элементом влагомера ВВ2. Преобразователь ДИВ-2 более стабилен во времени и долговечен.

Электрические сорбционные датчики можно разделить на адсорбционные и абсорбционные. В первых используется явление адсорбции влаги внешней поверхностью материала в виде тонкого слоя, а объектом измерения являются электрические характеристики этой поверхности (например, поверхностное сопротивление), обусловленные наличием на ней водной пленки с ионами водораст-

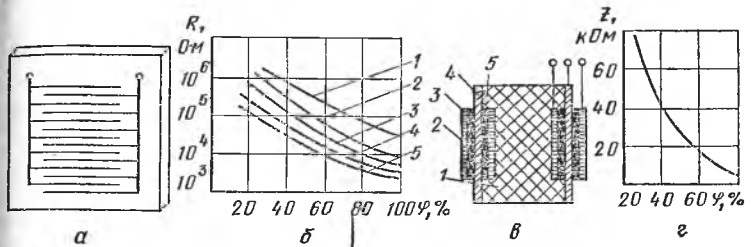


Рис. 21.4. Хлористо-литиевый гигрометрический датчик (а) и кривые (б) зависимости его сопротивления от влажности воздуха (при температуре: 1 — -40 °С; 2 — -20 °С; 3 — 0 °С; 4 — +20 °С; 5 — +40 °С); гигротермодатчик (в) и зависимость его полного сопротивления от влажности воздуха (г).

воримых веществ. В ЭГД второй группы чувствительный элемент представляет собой тонкий слой влагочувствительного материала на водостойкой подложке или определенный объем капиллярно-пористого материала. Механизм действия датчиков второй группы аналогичен: водяной пар, содержащийся в газе, поглощается капиллярами всего объема чувствительного элемента и изменяет его объемное сопротивление.

Наибольшее практическое применение получили сорбционные датчики следующих типов: угольные, пьезокварцевые и алюминиево-оксидные. Алюминиево-оксидный гигротермодатчик с температурной компенсацией показан на рисунке 21.4, в. На внутренней и внешней цилиндрических поверхностях тонкостенной алюминиевой трубки 4 имеются оксидные слои 3 и 5. Поверх этих слоев нанесены проводящие графитовые слои (электроды) 2. Внутренняя полость трубки 4 заполнена влагоизолирующим лаком 1, вследствие чего влагочувствительный слой 3 находится в гигротермическом, а слой 5 — только в термическом равновесии с окружающей средой. Такой «совмещенный» гигротермодатчик позволяет одновременно измерять влажность и температуру среды.

Влажностные характеристики датчиков получают экспериментальным путем при постоянной температуре. На рисунке 21.4, г

приведена снятая при $t=20^\circ\text{C}$ влажностная характеристика датчика, показывающая зависимость полного сопротивления от относительной влажности воздуха при частоте 50 Гц.

Промышленность выпускает пьезосорбционные преобразователи относительной влажности ДОВП-1, которые применяют в составе влагорегуляторов В4-536У и В4-510У в теплицах и овощехранилищах. Диапазон контролирования этих преобразователей от 0 до 100 % с погрешностью $\pm 2,5\%$. Они позволяют дистанционно контролировать влажность (до 1000 м) и имеют небольшую инерционность (2 мин).

Принцип действия гигрометров с кулонометрическими датчиками основан на непрерывном поглощении влаги пленкой гигроскопического вещества и одновременном электролитическом разложении поглощенной влаги. Наиболее простой и распространенный кулонометрический датчик — трубчатый. Он состоит из цилиндрической пластмассовой втулки, на внутренней поверхности которой закреплены два проволочных (платиновых) электрода в виде параллельных геликоидальных спиралей. На поверхности между электродами нанесена пленка частично гидратированной пятиокиси фосфора. Датчик закреплен в корпусе (пластмассовом или металлическом) с контактами для соединения датчика с измерительным устройством.

В диффузионном датчике часть влаги из исследуемого газового потока диффундирует сквозь пористый гидрофобный барьер, а затем подвергается электролизу. Скорость диффузии не зависит от скорости воздуха, поэтому в диффузионном гигрометре отпадает необходимость в регуляторе расхода газа, так как его функцию выполняет диффузионный барьер. Зависимость силы тока электролиза от влагосодержания у диффузионного датчика линейна в широких пределах. Его недостаток — существенное увеличение инерционности, особенно в диапазоне низких влагосодержаний.

Измерительное устройство кулонометрических гигрометров отличается простотой. Последовательно с датчиком и источником постоянного тока включен многопредельный прибор, измеряющий силу тока электролиза.

Глава 22. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СВОЙСТВ И СОСТАВА МОЛОКА И КОРМОСМЕСЕЙ

22.1. Какими методами можно определить качество смешивания кормов!

Качество кормосмесей, как правило, контролируется по распределению одного контролируемого компонента, например поваренной соли, причем применяемые химические и инструментальные методы определения доброкачественности кормов сравнительно длительны, требуют сложного лабораторного оборудования, что ограничивает их использование в реальных условиях кормопроизводства. Отсутствие постоянного контроля за качеством приготовления кормосмесей приводит к перерасходу кормов более чем на 30 % и к недополучению продукции животноводства. Поэтому ведутся работы по созданию экспресс-приборов, позволяющих быстро, иногда и непрерывно определять качество приготовления кормосмесей.

Рассмотрим некоторые из этих приборов.

На рисунке 22.1 приведена электрическая принципиальная схема портативного прибора для оценки качества измельченных кормов. Чувствительный элемент прибора — дифференциальный емкостный датчик выполнен в виде двух пар электродов-пластин, расположенных в одной плоскости. Они включены параллельно конденсаторам $C1$ и $C3$. Прибор состоит из двух мультивибраторов, собранных на транзисторах $VT1$, $VT4$ и $VT5$, $VT8$, которые генерируют прямоугольные импульсы напряжения, а также транзисторов $VT2$, $VT3$, $VT6$ и $VT7$, согласующих низкоомную нагрузку с выходами мультивибраторов.

При одновременном соприкосновении соответствующих электродных пар с исследуемой и эталонной пробами корма емкости

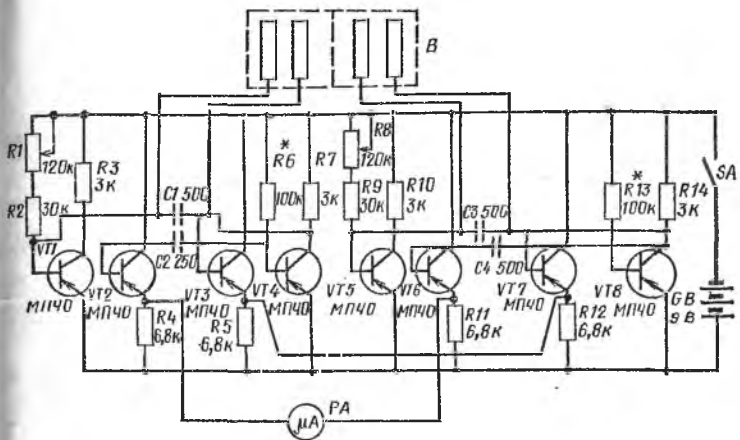


Рис. 22.1. Электрическая схема портативного прибора для оценки качества измельчения кормов.

конденсаторов изменяются. Это влечет за собой изменение скважности импульсов, генерируемых мультивибраторами. Постоянная составляющая токов, пропорциональная скважности импульсов и функционально зависящая от диэлектрической проницаемости исследуемого продукта, регистрируется микроамперметром PA . Резистор $R1$ предназначен для установки стрелочного указателя на центральный штрих шкалы, принятый за условный нуль, а $R8$ — для настройки оптимальной чувствительности измерительной схемы.

Прибор работает следующим образом. В коробочку с эластичной перегородкой закладывают эталонную пробу корма, на нее укладывают электроды датчика и прижимают определенным грузом. Стрелку устанавливают на нулевую отметку. Далее из одной половинки коробки убирают эталонную пробу и помещают туда пробу исследуемого корма, устанавливают электроды и прижимают их тем же грузом. Включают прибор. Если стрелка осталась на нулевой отметке, корм отлично приготовлен, то есть полностью соответствует эталонному. Если стрелка прибора отклоняется в ту или иную

сторону, то это свидетельствует о том, что приготовленная кормо- смесь не соответствует эталонной.

Испытания прибора показали, что продолжительность одного измерения не превышает 2 мин, включая все операции подготовки и определение результата. Размеры прибора определяются в основном размерами применяемого измерительного прибора, в качестве которого могут быть использованы микроамперметры М24 или М93 с номинальным током 100 мкА. Питание может быть от малогабаритного аккумулятора или батарейки.

Интересен портативный экспресс-регистратор доброкачественности кормосмесей (рис. 22.2), у которого измерительный преобразователь выдает на выходе величину, пропорциональную целому

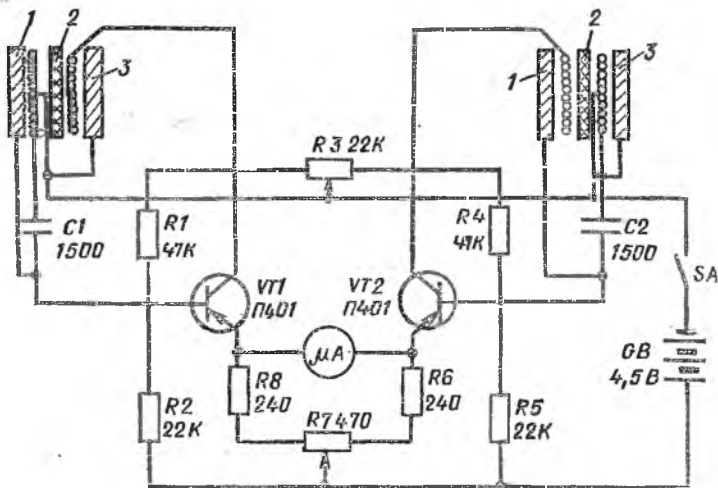


Рис. 22.2. Схема портативного экспресс-регистратора доброкачественности кормосмесей.

комплексу показателей кормосмеси (диэлектрической и магнитной проницаемости, диэлектрических потерь, электропроводности), косвенно определяющих его доброкачественность.

Измерительный преобразователь (ИП) имеет по два электрода 1 и 3, закрепленных в корпусе диэлектрических стаканов, между электродами симметрично установлены плоские катушки высокочастотных генераторов, собранных на транзисторах П401. Катушки намотаны на гетинаксовые пластинки 2 размером 85×35×5 мм. Для намотки использовали провод ПЭЛ диаметром 1,0 мм, число витков 67, отводы сделаны от 27 витков. Металлические пластинки 1 и 3 параллельно соединены с соответствующими емкостями C1, C2 колебательных контуров высокочастотных генераторов. В диагонали моста измерительной схемы включен микроамперметр М24. Резисторы R3 и R7 служат для балансировки моста.

Прибор работает следующим образом. Эталонную пробу сыпучего корма засыпают в оба ИП, уплотняют с постоянным усилием и стрелку прибора устанавливают на нулевую отметку. Затем один

на ИП освобождают от эталонной пробы и заполняют проверенным кормом, который уплотняют с тем же усилием. Если стрелка останется на нулевой отметке, то физико-химические параметры анализируемой и эталонной проб одинаковы.

Значение отклонения стрелки прибора от нуля характеризует степень несоответствия эталонной пробе, что позволяет судить о доброкачественности контролируемого корма.

Принцип действия прибора заключается в том, что при заполнении ИП анализируемым продуктом изменяются его диэлектрическая проницаемость и емкости $C1$ и $C2$ колебательных контуров, а одновременное соприкосновение плоских катушек колебательных контуров высокочастотных генераторов с пробами меняет добротность этих контуров из-за диэлектрических потерь, обуславливая

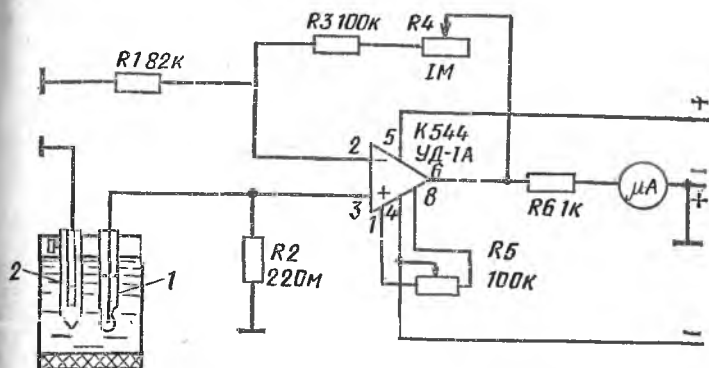


Рис. 22.3. Схема прибора для определения качества приготовления комбикормов.

ых электрофизическими параметрами корма, что влияет на режимы работы транзисторов $VT1$ и $VT2$ и вызывает соответствующее перераспределение токов в цепи измерительного моста. Таким образом, показания микроамперметра регистрируют комплекс функционально взаимосвязанных между собой электрофизических параметров, косвенно характеризующих качественное соответствие корма заданным параметрам.

Рассмотрим еще один прибор для определения качества приготовления комбикормов, принципиальная схема которого приведена на рисунке 22.3. Измерительный преобразователь выполнен в виде электродной пары, состоящей из высокоомного ионоселективного электрода 1 и сравнительного электрода 2 . Выходной сигнал, пропорциональный концентрации контролируемого компонента в пробе комбикорма, поступает на вход портиативного усилителя с высокоомным входом, собранным на основе интегральной микросхемы — операционного усилителя типа К544 УД-1А. Резистор $R4$ предназначен для регулировки чувствительности, а резистор $R5$ — для установки нуля измерительной системы. В качестве измерителя может быть любой микроамперметр с пределами измерений от 50 до 100 мкА, шкала которого предварительно проградуиро-

вана по стандартным водным растворам контрольного компонента. Питание может быть от двух батареек «Крона».

В качестве электрода *I* можно брать электрод типа ЗСЛ-51Г-0,5, а в качестве вспомогательного — электрод типа ЭВМ-1М. Оптимальная масса навески анализируемой пробы комбикорма 5...10 г. К навеске, помещенной в мерный стакан, добавляют 50 мл воды. В полученный суспензионный раствор опускают электродную пару и по шкале микроамперметра считывают данные о концентрации определенного компонента. Время на получение одной пробы не более трех минут. Погрешность измерений $\pm 1\%$. Габарит лимитируется размерами микроамперметра.

Таким образом, благодаря простой и общедоступной конструктивной схеме прибора, его портативности и автономности питания можно оперативно контролировать качество смешивания непосредственно в производственных условиях, чтобы оптимизировать экспозицию смешивания для конкретного рецептурного состава и типа применяемого смесителя. Кроме того, практический интерес представляет использование прибора в условиях хозяйств для контроля за качеством скармливаемых кормовых смесей.

22.2. Какими электрическими методами можно измерить жирность молока?

Качество молока зависит от количества жира и содержания в нем белка. Количество жира в молоке обычно колеблется от 2 до 6%. Поэтому, чтобы погрешность измерений не превышала 5% от минимального процента жирности, необходимо иметь абсолютную погрешность измерения ее по всей массе молока порядка 0,1...0,3%. Получить такую высокую точность измерения трудно.

Как правило, жирность определяют кислотным методом, что создает опасность для обслуживающего персонала. Этот метод требует сложного лабораторного оборудования, больших затрат времени, трудоемок, все это ограничивает применение его непосредственно на фермах. Вот почему проблема измерения жирности на фермах остается злободневной.

На рисунке 22.4 приведена принципиальная схема емкостного измерителя жирности молока. В зависимости от содержания жира в молоке изменяется его диэлектрическая постоянная, а следовательно, и емкость между двумя пластинками, разделенными слоем молока. На этом основана работа емкостных измерителей жирности молока.

Датчик C_D , представляющий собой стеклянный сосуд объемом 1 см³ с наклеенными по бокам двумя обкладками из фольги, включают в одно плечо измерительного моста, который состоит из двух транзисторных плеч ($VT2-R2-C_D$ и $VT3-R3-C_1$) и двух плеч резисторов ($R4-R5-R6$). В одну диагональ моста включают источник постоянного тока напряжением 4,5 В, а в другую — миллиамперметр PA .

К базам транзисторов $VT2$ и $VT3$ подводят от обмотки II трансформатора TV напряжение высокой частоты 1 МГц, вырабатываемое генератором (транзистор $VT1$). Задающим является контур $L1-C2$, включенный в цепь эмиттер-коллектор транзистора $VT1$. Обратная связь с базой индуктивно-емкостная и осуществляется ча-

стью витков катушки $L1$ и конденсаторами $C4$ и $C3$. Цепь $R1$ — $L2$ защитная.

Измерительный мост при равенстве емкостей $C1$ и C_D балансируется резистором $R5$. Для регулировки прибора емкость C_D заполняют молоком с известным процентом жирности. Когда вместо эталонного молока в емкость наливают молоко, жирность которого нужно измерить, наступает нарушение балансировки моста и прибор PA показывает отклонение измеряемой жирности молока от эталонной.

Измерение емкости преобразователя жирности молока можно фиксировать и другими способами, как с визуальным наблюдением

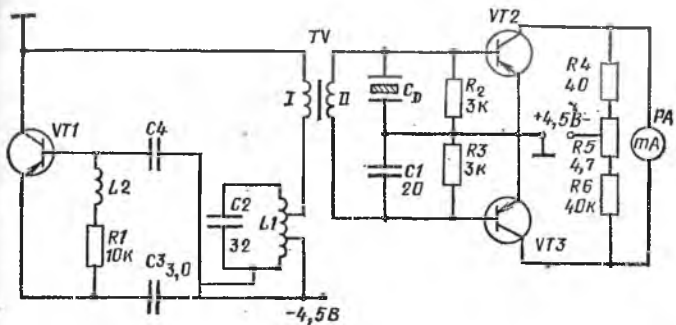


Рис. 22.4. Принципиальная схема емкостного измерителя жирности молока.

за результатом измерения, так и с регистрацией их на пленку или бумагу.

В объединении «Агроприбор» сконструирован быстродействующий прибор, определяющий процент содержания жира в молоке за 30 с. В основе его работы — свойство жировых шариков светиться при облучении инфракрасным излучением. Свечение жировых шариков вызывает на выходе фотоэлемента фототок, проходящий через измерительный прибор. По значению фототока судят о количестве жира в молоке. Для отделения свечения жировых шариков от постороннего света используют светофильтр.

Для обеспечения высокой точности измерения необходим стабилизированный источник напряжения.

С целью устранения влияния на показание приборов других компонентов молока в некоторых приборах используют два одинаковых датчика; в один из них наливают молоко, жирность которого требуется измерить, а в другой это же молоко, но обезжиренное. Для получения обезжиренной пробы молока используют различные фильтры, например, «Синпор-6» с диаметром пор $0,4 \pm 0,06$ мкм или ядерные фильтры с тем же размером пор.

Конструкция ячеек для пробы молока показана на рисунке 22.5, а. Наружный электрод 1 выполнен из отрезка алюминиевой трубы, заглушенного с одной стороны фторопластовой вставкой 5. В центре фторопластовой вставки установлен алюминиевый центральный электрод 3. Оба электрода имеют изолирующее покрытие 4 из фторопластового лака с отверстиями 2. Две такие ячейки для

обезжиренной и жиросодержащей проб молока закрепляют на подставке. Выводы делают из наружного и центрального электродов и подключают к прибору. Ячейки закрывают крышками.

Конструкция насадки для фильтрации молока к ветеринарному шприцу ШВВ, ШВВГ или ШТВ с удлиненным иконечником емкостью 10 мл показана на рисунке 22.5, б. Насадку 9 крепят к шприцу 7 прижимной гайкой 8. В кольцевой паз насадки для уплотнения вставляют резиновое кольцо 10. На него кладут фильтр 11 и прижимают к насадке крышкой 6, в которую для отвода отфильтрованного молока вставлена игла 12. Насадка, крышка и прижимная гайка сделаны из органического стекла.

Заслуживает внимания применение дифференциальных схем, в которых используются, например, два емкостных преобразователя. В одном из них находится эталонная проба, соответствующая

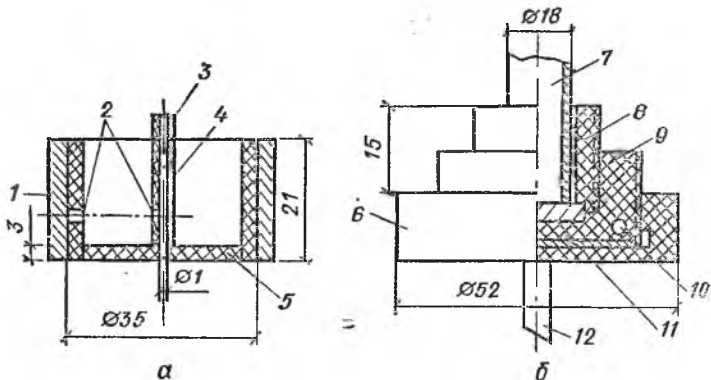


Рис. 22.5. Конструкция ячейки для проб молока (а) и насадка на шприц для фильтрации молока (б).

стандартной жирности молока, а в другом — проба исследуемого молока. Прибор настраивают на нулевую отметку при жирности молока, равной эталонной. Тогда при отклонении жирности от стандартной стрелка измерительного прибора будет отклоняться либо в положительную сторону при жирности выше нормы, либо в отрицательную при ухудшении качества молока.

22.3. Как измерить количество белка в молоке?

Питательная ценность молока определяется процентным содержанием в нем не только жира, но и белка. Существующие приборы для измерения количества белка сложны и громоздки, стоимость их высока. Подготовка к работе и процесс измерений отнимают много времени и требуют высокой квалификации обслуживающего персонала. Поэтому разработан ряд простых электрических приборов для быстрого измерения количества белка в молоке.

В индикаторе белка в молоке, структурная схема которого показана на рисунке 22.6, а, использовано свойство белка люминесцировать при облучении его ультрафиолетовыми излучениями, при-

чем интенсивность люминесценции пропорциональна количеству белка.

Прибор содержит источник УФ излучения 2, возбуждаемый ВЧ генератором 1, приемник вторичного излучения 3, дифференциальный усилитель 4 и индикатор 5. Пробу исследуемого молока заливают в кювету и облучают УФ излучениями. Молоко начинает люминесцировать, и это излучение регистрирует приемник, расположенный вблизи поверхности пробы. Приемник воздействует на дифференциальный усилитель, что отражается на показаниях индикатора. Молоко перед измерением разбавляют 40 %-ным раствором мочевины (10 частей раствора на 1 часть молока), это уменьшает зависимость равномерности и интенсивности люминесценции от раз-

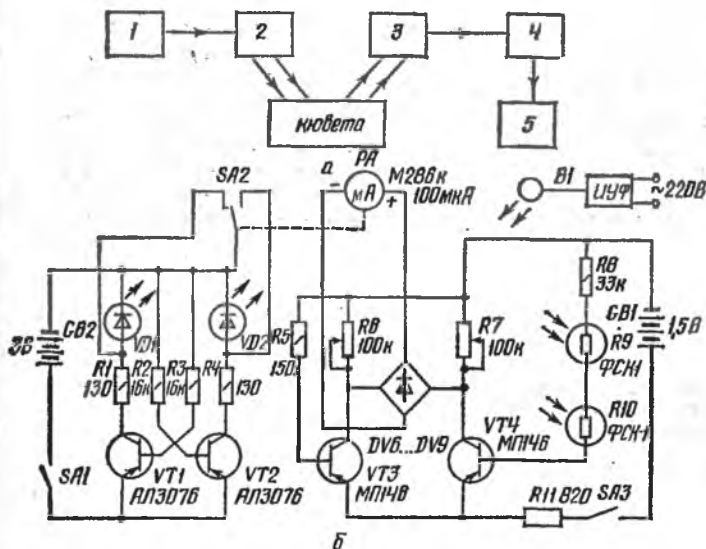


Рис. 22.6. Структурная (а) и принципиальная (б) схемы индикатора белка в молоке.

меров белковых частиц в молоке. Пределы измерений содержания белка от 1 до 5 %, продолжительность измерения 0,1 мин, область спектра УФ излучения 0,23...0,28 мкм.

Источником УФ (ИУФ) излучения служит серийно выпускаемый бытовой прибор «Фотон». Он содержит ВЧ генератор (40,68 МГц) и бесконтактную кварцевую ртутную лампу EL (рис. 22.6, б).

Прибор состоит из индикатора предельных значений содержания белка в молоке и дифференциального усилителя. Индикатор состоит из светодиодов VD1 и VD2 и мультивибратора на транзисторах VT1 и VT2, задающего частоту мигания светодиодов. Включением того или иного светодиода управляет встроенная в микроамперметр M286K группа контактов SA1, подвижный контакт которой связан со стрелкой микроамперметра PA. Крайние контакты группы SA1 могут быть установлены на любом участке шкалы

микроамперметра. Для перемещения контактов на лицевой панели микроамперметра имеются две ручки.

Дифференциальный усилитель — основной узел прибора — предназначен для измерения интенсивности люминесценции. Он выполнен на транзисторах $VT3$ и $VT4$ и диодах $VD3$. . $VD6$, образующих выпрямительный мост, в измерительную диагональ которого включен микроамперметр PA , показывающий уровень люминесценции и, следовательно, количество белка в исследуемой пробе.

Переменные резисторы предназначены для регулировки баланса дифференциального усилителя. В цепь базы транзистора $VT4$ включены фоторезисторы $R9$ и $R10$, образующие приемник вторичного излучения. Применение двух фоторезисторов связано с необходимостью увеличения чувствительности светоприемника. Для этой же цели фоторезисторы установлены в непосредственной близости от поверхности пробы молока (около 4 мм).

Индикатор предельных значений содержания белка в молоке особенно удобен для проведения быстрого анализа большого числа проб молока, когда достаточно знать, находится ли в пределах нормы количество белка в пробах молока. При этом, если стрелка находится между крайними делениями выделенного участка шкалы, вспыхивают оба светодиода, это говорит о том, что количество белка в пробе находится в пределах установленной нормы. Когда стрелка переходит на одно из крайних делений, гаснет либо светодиод $VD1$, указывая на то, что белка в пробе меньше нормы, либо $VD2$, показывающий на наличие белка в молоке выше установленной нормы.

Шкалу прибора градуируют по стандартным образцам. Поскольку зависимость тока микроамперметра от содержания белка линейная, то для градуировки шкалы достаточно трех образцов. Первый из них желательнее иметь с содержанием белка, равным 1 %, тогда показание гальванометра PA должно быть 20 мкА, второй образец с содержанием белка 2,5 % — показание PA должно быть 50 мкА и третий — 5 %, а показание PA — 100 мкА.

Шкалу прибора можно отградуировать непосредственно в процентах содержания белка в пробе.

Промышленность выпускает белкомер молока БМЦ-1 — фотокалориметрический электронно-цифровой прибор. В комплект белкомера входят механический блок с дозаторами, шприцами, электроприводом, механизмом перемещения пипеток и мешалок, рейкой и кассетой со стаканчиками, а также фотопреобразователь и измерительный блок. Блок состоит из устройства для преобразования сигнала с фотопреобразователя в цифровой код, цифрового индикатора и источника питания.

Принцип действия прибора БМЦ-1 основан на взаимодействии 1 мл молока и 20 мл кислотного красителя. При этом выпадает осадок краситель, связанный с белком, следовательно, концентрация красителя в растворе уменьшается, изменяются оптические свойства раствора. Раствор центрифугируют и фотокалориметрическим способом определяют количество белка в нем. Производительность прибора 100 анализов в час, диапазон измерений содержания белка 2,5, . . 5,5 %, абсолютная погрешность измерений $\pm 0,2$ %.

23.1. Какие электрические методы используются в агропромышленном комплексе для измерения уровня?

Методов измерения уровня существует несколько. Выбор метода измерения уровня зависит от физических и химических свойств продукта, его температуры, давления среды и т. д. Основные методы измерения уровня: весовой, поплавковый, емкостный, индуктивный, гидростатический, радиоактивный.

Наиболее точным методом измерения является радиоактивный (основная погрешность 0,5 %) при измерении изменений уровня жидкости до 2 м. Гидростатический и поплавковый обеспечивают измерение уровня в пределах соответственно от 0,025 до 6,3 м и от 0,025 до 16 м с относительной погрешностью 1...2 %. При помощи емкостного метода можно измерять уровни от 0,2 до 20 м с основной погрешностью $\pm 2,5$ %.

Весовой метод. В весовых уровнемерах значение уровня определяют по весу вещества, заполняющего определенную емкость. Так как вес емкости с соответствующей арматурой постоянен, то по нему можно судить об уровне вещества. Применение этого метода ограничено.

Поплавковый метод. Наиболее просты по устройству приборы, в которых используется поплавковый метод измерения уровня жидких сред. Принцип их действия основан на том, что на погруженное в жидкость тело действует выталкивающая сила. Этот принцип конструктивно реализуется при помощи различных поплавков, тросов и рычагов. Большинство уровнемеров такого типа работают как датчики верхнего и нижнего уровня жидкости, поэтому в дальнейшем они не рассматриваются.

Емкостный метод. Чувствительным элементом емкостных уровнемеров является емкостный преобразователь, имеющий два электрода, разделенных слоем диэлектрика. В уровнемерах емкостный преобразователь, как правило, имеет один специальный рабочий электрод, а вторым электродом служит металлическая стенка резервуара. Между ними находится среда, уровень которой измеряется. Если среда неэлектропроводна, то с изменением ее количества между электродами изменяется диэлектрическая проницаемость, а если среда электропроводна, то с изменением ее уровня как бы изменяется расстояние между электродами.

Емкостные уровнемеры делят на две группы: мостовые и резонансные. В мостовых приборах электрическую емкость датчика включают в одно из плеч неуравновешенного моста переменного тока. При изменении уровня изменяется емкость преобразователя, мост разбалансируется, и в его измерительной диагонали появляется напряжение небаланса, измеряемое вторичным прибором. Если мост уравновешенный, то о результате измерения можно судить по значению образцовой емкости, включаемой в плечо сравнения.

В резонансных приборах емкость датчика включают в колебательный контур, который обычно питается от высокочастотного генератора и настраивается в резонанс либо при отсутствии между электродами измеряемой среды, либо при определенном заранее заданном уровне. Поэтому при изменении уровня измеряемой среды

емкости датчика меняется, что приводит к выходу контура из резонансного состояния и резкому увеличению сопротивления контура. Этот принцип измерения сопротивления колебательного контура при изменении уровня среды и используют в уровнемерах второй группы.

Основные достоинства емкостных приборов — их высокая чувствительность, малая инерционность, небольшие размеры, их можно использовать для дистанционного измерения уровня.

Индуктивный метод. В уровнемерах с индуктивными преобразователями значение уровня определяют по изменению сопротивления катушки при перемещении в ней ферромагнитного сердечника. Степень перемещения сердечника зависит от уровня продукта.

Гидростатический метод. Гидростатические уровнемеры имеют механический воспринимающий элемент, устанавливаемый в емкости или вблизи нее. Выходным параметром служит их деформация, пропорциональная воспринимаемому ими давлению продукта.

Радиоактивный метод. При необходимости измерения уровня без проникновения в контролируемую среду удобно применять радиоактивные уровнемеры. Они состоят из двух основных частей, а именно, из источника и приемника излучения. Принцип работы основан на том, что поток гамма-излучений, проходя через контролируемую среду, ослабляется, что и фиксируется специальным счетчиком и регистрирующим прибором.

23.2. Как измерить уровень жидкости!

Для измерения уровня жидкости в глубоких скважинах или резервуарах широко используют емкостные датчики, выполненные, например, из двух изолированных проводов, опущенных в воду и расположенных параллельно один другому на определенном расстоянии.

Емкость двух взаимно параллельных проводников будет зависеть от диэлектрической проницаемости среды, оказавшейся между ними. Поскольку диэлектрическая проницаемость воды в 80 с лишним раз больше диэлектрической проницаемости воздуха, то по мере увеличения уровня воды будет увеличиваться и емкость такого датчика. Это изменение емкости можно зафиксировать либо при помощи моста переменного тока, либо включением этой емкости в колебательный контур генератора высокой частоты и т. п.

Среди емкостных уровнемеров можно выделить уровнемеры типа РУС, индикаторы и сигнализаторы ЭИУ2 и ЭСУВК-1. Их технические данные приведены в таблице 23.1.

Просты по устройству и надежны в работе индуктивные преобразователи уровня. Так, если поплавок 1 (рис. 23.1, а) при помощи штанги 2 связать с ферромагнитным сердечником 3 катушки, намотанной на неферромагнитном каркасе 4 и состоящей из двух частей I и II, то при увеличении уровня жидкости сердечник будет перемещаться вверх и заполнять внутреннее пространство части I катушки. В результате этого индуктивное, а следовательно, и полное сопротивление верхней части катушки будет увеличиваться, а нижней, или II, — уменьшаться. Поэтому, если сопротивление этих двух частей катушки включить в прилегающие плечи моста переменного тока, включающего постоянные резисторы R_1 и R_2 , то напряжение небаланса моста $U_{\text{нб}}$ будет зависеть от уровня жидко-

сти. Остается подобрать измерительный прибор и отградуировать его шкалу в единицах уровня.

На таком принципе работают дистанционные индикаторы уровня типа ДИУ-С4А-630-32, ДИУ-С4А-1000-320, ДИУ-С4А-1600-320, предназначенные для регистрации и регулирования уровня жидкости в сосудах под давлением до 32 МПа. Вторичными преобразователями в этих устройствах служат электрический преобразователь ДЭВ-П-С4А и электронный показывающий и самопишущий прибор КСДЗ. Диапазон измерения 0...1000 и 0...1600 мм с погрешностью измерения $\pm 5\%$.

Наиболее простой схемой уровнемера, позволяющей дистанционно измерять уровень воды, может служить прибор, в котором использованы дифференциальные индуктивные преобразователи. На рисунке 23.1, б показана принципиальная схема такого уровнемера.

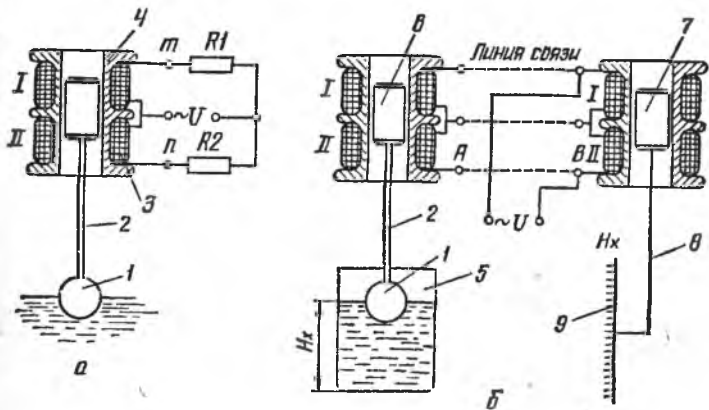


Рис. 23.1. Индуктивные преобразователи:

а — с мостом переменного тока; б — с дистанционной передачей.

Из рисунка видно, что рабочая часть прибора состоит из дифференциальной катушки А, поплавка 1, штанги 2 и ферромагнитного сердечника б. Поплавок 1 плавает на поверхности воды в резервуаре 5.

Измерительная часть уровнемера состоит из аналогичных катушек В и ферромагнитного сердечника 7, системы рычагов с указателем 8 и шкалы 9 прибора. Рабочая часть уровнемера расположена на объекте измерения, а измерительная часть может находиться, например, в диспетчерской. Рабочая часть прибора связана с измерительной трехпроводной линией связи.

Принцип работы уровнемера заключается в следующем. Изменение уровня воды вызывает перемещение сердечника б, что приводит к изменению сопротивления частей I и II катушки А. Это изменение сопротивлений вызывает перераспределение токов в частях I и II катушки В и перемещение сердечника 7 в направлении, аналогичном смещению сердечника б до уравнивания моста схемы. Таким образом, сердечник 7 копирует перемещение сердечника б, а перемещение последнего зависит от изменения уровня в резервуаре.

23.1. Техническая характеристика емкостных уровнемеров

Тип	Назначение уровнемера	Диапазон измерений, м	Основная погрешность или класс точности
РУС	Измерение уровня жидкости	0...0,2; 0...0,4; 0...0,6; 0...1; 0...1,6; 0...2,5; 0...4; 0...6; 0...10; 0...16; 0...20	0,5; 1; 1,5; 2,5
ЭСУВК-1	То же	3 сигнализирующих уровня	± 2 м
ЭИУ-2	Измерение уровня сыпучих материалов: кабельный тросовый	3...10	} $\pm 2\%$ 1
		4...20	
	Измерение уровня жидкости: стержневой, пластинчатый кабельный тросовый	0,6...2,5	} $\pm 2\%$ 1
		3...10 4...20	

ре, следовательно, шкалу прибора можно отградуировать в единицах измерения уровня. Длина линии связи может достигать 500 м.

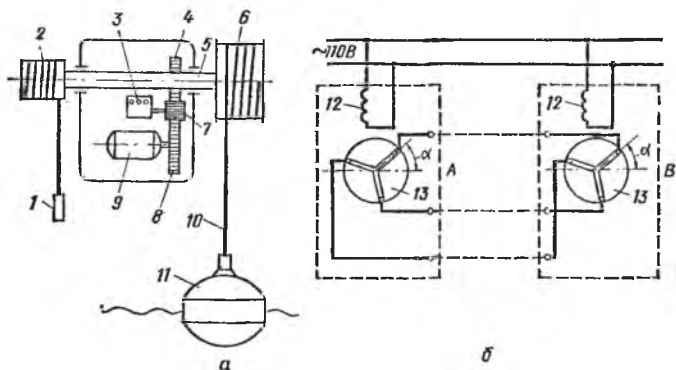


Рис. 23.2. Устройство уровнемера типа ДСУ-1М (а) и схема сельсинной передачи результатов измерений (б).

В уровнемере типа ДСУ-1М (рис. 23.2, а) результат измерения может передаваться на значительные расстояния при помощи сельсинов. Уровнемер состоит из поплавка 11, троса 10, намотанного на барабан 6; барабан 6 связан валом 5 со вспомогательным бараба-

ном 2, на котором при помощи троса закреплен противовес 1. На валу 5 сидит шестеренка 4, которая передает вращение шестеренке 7, а через нее счетному механизму 3; через шестерню 8 вращение передается сельсину 9.

Передаточное число шестеренчатого редуктора подобрано так, чтобы при максимальном изменении уровня жидкости ротор сельсина мог повернуться на угол не больше 360° . Принцип синхронной передачи угла поворота ротора рабочего сельсина ротору сельсина-приемника, который может находиться от первого на расстоянии нескольких километров, заключается в следующем. При изменении уровня воды поплавков 11 перемещается то вниз под действием собственного веса (при понижении уровня воды), то вверх под действием момента, создаваемого противовесом на вспомогательном барабане 2 (при увеличении уровня воды). В результате поворота вала 5 через систему зубчатых колес 4, 7 и 8 поворачивается ротор 13 (рис. 23.2, б) рабочего сельсина А на некоторый угол α относительно оси статора и его возбуждающей обмотки 12. Это вызывает смещение наводимой в обмотках ротора (сельсина А) ЭДС \overline{E}_A на такой же угол α по отношению к направлению ЭДС до поворота ротора. Направление ЭДС \overline{E}_B , наводимой в соответствующей фазе ротора сельсина-приемника В, остается в этот момент прежним, следовательно, между направлениями ЭДС \overline{E}_A и \overline{E}_B возникает угол сдвига фаз, равный углу α .

Если учесть, что обмотки ротора рабочего сельсина и сельсина-приемника включены встречно, то сразу становится ясно, что при появлении угла сдвига фаз между \overline{E}_A и \overline{E}_B возникает результирующая ЭДС \overline{E} , равная геометрической разности \overline{E}_A и \overline{E}_B . Появление \overline{E} вызывает ток в соединительных проводах и в самих обмотках роторов. В результате взаимодействия магнитных полей, создаваемых обмотками статоров с проводниками, с током роторов на валу каждого ротора возникает вращающий момент. Но поскольку ротор рабочего сельсина развернуться не может, так как связан с поплавком через редуктор, то он остается неподвижным, а ротор сельсина-приемника под действием этого момента начинает поворачиваться. Ротор сельсина-приемника будет поворачиваться до тех пор, пока вращающий момент не станет равным нулю. А это произойдет, когда направление ЭДС \overline{E}_B совпадет с направлением ЭДС \overline{E}_A , то есть ротор сельсина-приемника автоматически повторяет положение ротора рабочего или преобразующего сельсина; поэтому на большом расстоянии от объекта измерения можно непрерывно следить за уровнем жидкости в интересующем резервуаре при помощи специального счетного механизма.

Пределы измерений уровня сельсином-приемником УСА-1М: 1,25; 2,5; 5; 7,5; 10; 12; 20 м. Длина линии связи определяется сопротивлением проводов, которое должно быть не более 30 Ом. Так, при использовании провода площадью поперечного сечения 4 и 6 мм² показания могут передаваться на расстояние до 10 км.

23.3. Как измерить уровень сыпучих материалов!

Электромеханический измерительный преобразователь уровня с крыльчаткой типа УКМ-Р показан на рисунке 23.3. Преобразователь состоит из крыльчатки 1, которая является воспринимающим

элементом датчика и медленно вращается электродвигателем 2 через червячную пару 3, 4. Если крыльчатка погружается в продукт, то она перестает вращаться, и червяк начинает перемещаться в сторону расположения микропереключателя 7. При этом сжимается пружина 6, перемещается толкатель 5, который замыкает микропереключатель 7. Микропереключатель выключает синхронный микроэлектродвигатель, включает сигнальные лампы и аппаратуру управления.

При освобождении крыльчатки от продукта червяк 3 под действием пружины 6 возвращается в исходное положение, отводит от микропереключателя толкатель 5, микропереключатель отключается и снова включает микроэлектродвигатель. Крыльчатка опять начинает вращаться до тех пор, пока снова не погрузится в продукт,

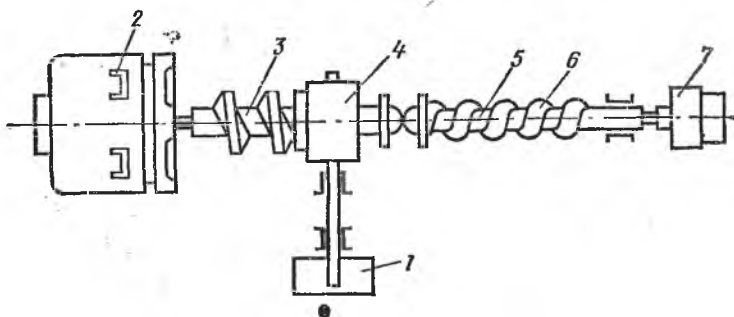


Рис. 23.3. Преобразователь уровня УКМ-Р.

Датчик уровня УКМ-Р можно применять для контроля уровня трудносипучих продуктов, например для компонентов комбикормового производства.

Измерительный преобразователь можно монтировать в горизонтальном, вертикальном или наклонном положениях.

Для непрерывного дистанционного измерения уровня как сыпучих, так и жидких электропроводных и диэлектрических сред может быть применен емкостный индикатор уровня типа ЭИУ-2. Он состоит из трех основных частей: емкостного преобразователя, электронного блока и измерительного прибора.

Емкостный преобразователь в зависимости от уровня измеряемой жидкости или другой среды может иметь различную конструкцию. В принципе электронный блок позволяет использовать датчики с пределами измерений уровня от 1 до 20 м. Электронный блок включает в себя индуктивно-емкостный мост, генератор синусоидального тока, выдающий частоту 100 кГц для питания моста, усилительный каскад и блок питания.

В качестве вторичного прибора используют магнитоэлектрический прибор М325 или подключают электронный регистрирующий потенциометр с входным сигналом 0...100 мВ типов ЭПД и ЭПВ.

Рассмотрим принципиальную схему радиоизотопного уровнемера УР-8 (рис. 23.4). Прибор состоит из следующих основных частей: источника излучения 2, укрепленного на одном конце металлической ленты 4 с поплавком 1. На другой ленте укреплен приемник излу-

чения 10. При помощи реверсивного двигателя 5 через червячную передачу 6 металлические ленты 4 наматываются на барабан 7 так, что источник излучения и приемник устанавливаются на одном уровне.

Если изменяется уровень среды, то поплавков 1 либо поднимается вверх, либо опускается вниз и изменяет положение источника 2, гамма-излучение перестает поступать на приемник, и он подает электрический сигнал на вращение двигателя 5, который восстанавливает положение приемника, перемещает его до нового уровня.

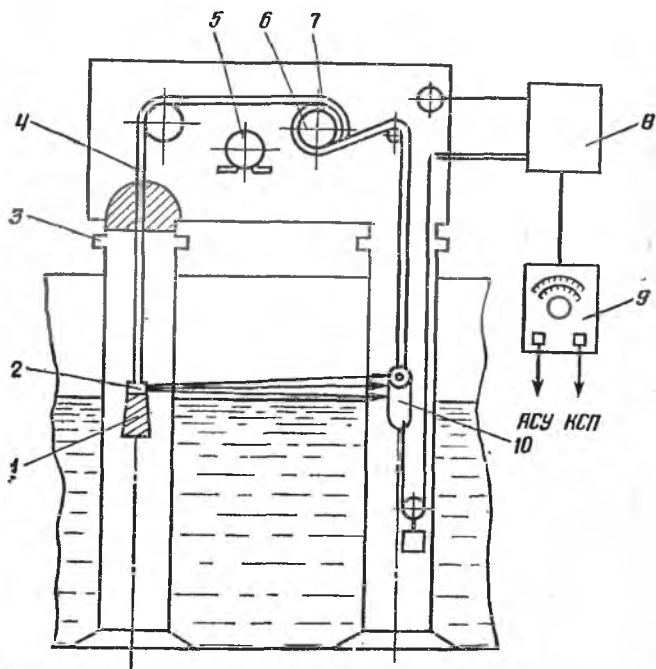


Рис. 23.4. Радиоизотопный уровнемер УР-8.

расположения источника излучения. Движение приемника передается электронному блоку 8 и далее вторичному показывающему прибору 9, а от него может подаваться на автоматический самопишущий потенциометр и т. п.

Источник радиоактивного излучения, например цезий-137, можно устанавливать снаружи силосов или бункеров, на линии контролируемого уровня. Приемники радиоактивного излучения тоже можно монтировать снаружи на противоположной стороне силоса или бункера таким образом, чтобы поток излучений от излучателя попадал на приемник.

В уровнемере УР-8, показанном на рисунке 23.4, источник излучения и приемник смонтированы в специальных опорах 3, пронизывающих контролируемую среду, но тоже без непосредственного контакта с ней,

Диапазон измерения уровня сыпучих или жидких сред уровнем УР-8 составляет 200, 400, 600, 800 и 1000 см. При необходимости измерения уровня до 15 м и с большей точностью применяют радиоизотопный автоматический уровнемер типа УДАР-5, который позволяет измерять, сигнализировать и регулировать контролируемый уровень щелочных, кислотных, взрывоопасных жидкостей и сыпучих тел. Мощность прибора 80 Вт, напряжение 220 В, частота 50 Гц. Принцип его работы подобен принципу работы прибора типа УР-8.

Глава 24. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

24.1. Какие методы измерения давления используются в агропромышленном комплексе?

Давление измеряют специальными приборами: манометрами — давление выше атмосферного, вакуумметрами — давление ниже атмосферного, мановакуумметрами — положительные и отрицательные избыточные давления, барометрами — атмосферное давление и т. п.

По принципу действия приборы для измерения давлений и разрежений делятся на следующие типы:

жидкостные, в которых давление или разрежение уравнивается давлением столба жидкости соответствующей высоты;

пружинные, в которых давление уравнивается силой упругой деформации чувствительного элемента;

поршневые, в которых измеряемое давление уравнивается силой, действующей на поршень определенной площади сечения;

электрические, в которых используются изменение ЭДС термопары, изменение сопротивления терморезисторов, явление электрического разряда, изменение ионизации газа и т. д.

Для измерения давления выпускают приборы следующих классов точности: 0,02; 0,05; 0,4; 0,6; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

24.2. Как измерить положительное избыточное давление?

Рассмотрим электрические приборы, используемые в агропромышленном комплексе для измерения избыточного давления.

Из манометров, имеющих электрическое сигнальное устройство, можно отметить манометры ЭКМ-1У, ЭКМ-2У, МПЧ-III, ЭКМВ. Эти приборы предназначены для измерения, позиционного регулирования давления неагрессивных жидкостей и газа и сигнализации. Класс точности 1,5. Пределы измерений манометров следующие:

Тип прибора	Пределы измерений
ЭКМ-1У, ЭКМ-2У	0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160
МПЧ-III	0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160
ЭКВЭМ-1 и МВПЧ-III мановакуумметры	0,06; 0,15; 0,3; 0,5; 0,9; 1,5; 2,4

Для дистанционного измерения давления применяются электрические пружинные манометры типа МП-Э (или сильфонные МС-Э1), в которых происходит непрерывное преобразование избыточного давления в пропорциональный электрический унифицированный сигнал в виде постоянного тока 0...5 мА. Преобразование выполняется следующим образом. Измеряемое давление преобразуется одновитковой трубчатой пружиной 1 (рис. 24.1) в перемещение постоянного магнита 6, который создает управляющие воздействия в виде магнитного потока Φ_m . Этот поток компенсируется магнитным потоком обратной связи $\Phi_{o.c.}$, возникающим при протекании в обмотках обратной связи $w_{o.c.}$ выходного сигнала постоянного тока I . При

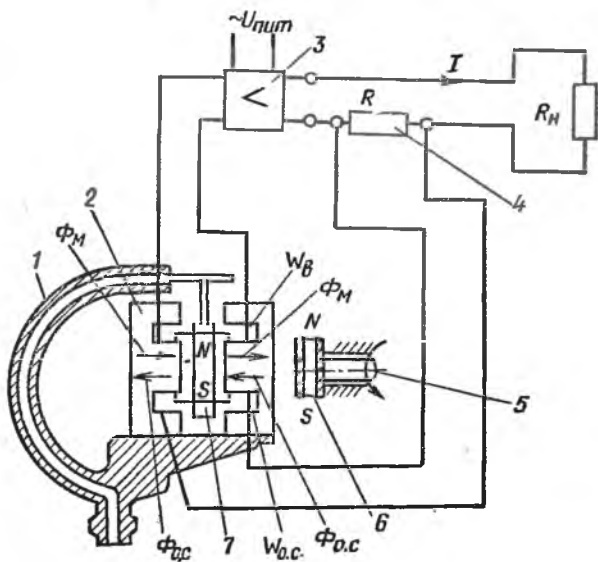


Рис. 24.1. Принципиальная схема пружинного манометра МП-Э.

изменении потока $\Phi_{o.c.}$ меняется намагниченность сердечников магнитомодуляционного преобразователя 2, а в его обмотках возникает сигнал рассогласования. Этот сигнал управляет сигналом I усилительного устройства 3, который передается в линию дистанционной передачи и одновременно в обмотку обратной связи. Настройка диапазона измерений осуществляется резистором 4 настройки нуля путем плавного перемещения постоянного магнита 6 при помощи винта 5.

Эти манометры могут применяться в комплекте с вторичными приборами, регуляторами и другими устройствами автоматики, машинами централизованного контроля и системами управления с выходными сигналами 0...5 мА постоянного тока.

Верхние пределы измерений прибора выбирают от 3920 до 58800 кПа. Класс точности прибора 1,0.

На этом же принципе действия работают манометры ММЭ, МП-Э1-В4, МП-Э2-В4, МС-Э1-В4, МС-Э2-В4 и др. (табл. 24.1).

24.1. Техническая характеристика электрических манометров

Тип прибора	Пределы измерений, МПа	Класс точности
МП-Э	2,5...60	1
ММЭ	0,16...1,6	1
МП-Э1-В4	0,6...60	1
МП-Э2-В4	0,6...60	1
МС-Э1-В4	0,1...0,4	0,6; 1
МС-Э2-В4	0,1...0,4	0,6
МВС-Э1	0,6...2,4	1
МВС-Э2	1,5...2,4	1
ВС-Э1	-0,1...0	1
ВС-Э2	-0,1...0	1

Примечания: 1. В4 — означает взрывозащищенное исполнение. 2. Приборы предназначены для непрерывного преобразования избыточного давления (В — вакуумметр) газа или пара в унифицированный электрический сигнал.

Для примера рассмотрим еще один бесшкальный преобразователь давления типа МЭД, в котором для непрерывного преобразования давления (разрежения) в унифицированный выходной сигнал переменного тока используется индуктивный трансформаторный преобразователь давления.

Упругим чувствительным элементом прибора является трубчатая манометрическая пружина, смонтированная в держателе. Свободный конец трубчатой пружины перемещается пропорционально давлению (разрежению), подаваемому на вход прибора. Сердечник дифференциального трансформатора связан со свободным концом трубчатой пружины специальным винтом.

Катушка индуктивного преобразователя закрыта экраном, на корпусе преобразователя установлен штепсельный разъем для подключения регистрирующего прибора. Первичная обмотка преобразователя МЭД питается переменным током 125 мА от регистрирующего прибора.

При измерении давления свободный конец пружины перемещается и изменяет положение сердечника дифференциального трансформатора. При этом изменяются значение и фаза напряжения на вторичной обмотке трансформатора, которое подается на регистрирующий прибор типа КСД2.

Манометры типа МЭД устанавливают вблизи места измерения давления вертикально штуцером вниз и соединяют четырехжильным кабелем через штепсельный разъем со вторичным измерительным прибором. Вторичные измерительные приборы выносят в помещения с нормальными условиями окружающей среды, они должны быть удалены от мощных источников магнитных полей (электродвигателей, трансформаторов).

Манометры типа МЭД имеют пределы измерений от 0 до 1,6 МПа, а мановакуумметры — от -0,1 до +2,4 МПа. Класс точности 1; 1,5.

Аналогичный принцип действия имеют датчики пульсирующих

давлений ДИ-6, ДИ-10, ДИ-60, ДИ-150, ДИ-400, входящие в комплект установки «Урожай-1М».

Для измерения быстропеременных давлений удобно применять малоинерционные пьезоэлектрические преобразователи, позволяющие измерять давление в диапазоне частот от 30 до 2000 Гц. Принципиальная электрическая схема такого датчика показана на рисун-

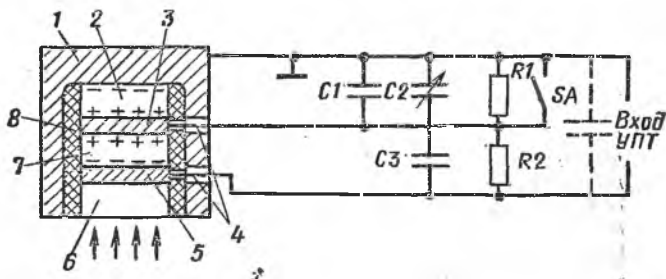


Рис. 24.2. Схема датчика для измерения быстропеременных давлений.

ке 24.2. Датчик состоит из стального корпуса 1, пластин из керамики титаната бария 2 и 7, стальных электродов 3 и 5, предохранительного стекла 6 и выходных контактов 4. Все перечисленные детали жестко скреплены между собой и с корпусом кардинальным клеем 8. Датчик работает следующим образом. При сжатии пьезопластин за счет изменяемого давления на их обкладках возникают избыточные электрические заряды, которые накапливаются на обкладках конденсаторов C_1 , C_2 и C_3 . При этом, если емкости C_1 и C_2 в сумме

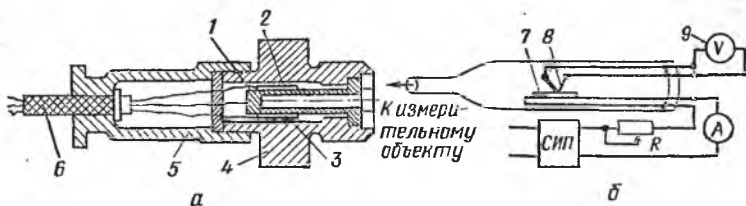


Рис. 24.3. Манометр для измерения быстропеременных давлений с проволочным преобразователем (а) и схема электрического вакуумметра (б).

равны емкости конденсатора C_3 и параметры пластин одинаковы, то ток на выходе усилителя постоянного тока УПТ равен нулю.

В данной конструкции датчика пьезопластина 7 является измерительной, другая 2 — контрольно-балансирующей. Балансировку схемы выполняют при нулевом давлении при помощи конденсатора переменной емкости C_2 и резисторов R_1 и R_2 . Давление измеряют при замкнутом ключе SA .

Одна из конструкций манометра для измерения быстропеременных давлений с использованием проволочных преобразователей показана на рисунке 24.3, а. Газ или жидкость поступает с внутрен-

ией стороны колпачка 1. Возникающие при этом деформации вос- принимаются проволочными преобразователями (тензодатчиками) 2 и 3, наклеенными на его наружной поверхности. Колпачок, укреп- ленный в корпусе 4, сообщается с областью измеряемого давления.

Выводы от тензодатчиков проходят через изоляционную втулку 6, укрепленную в крышке 5. Этими выводами прибор подключают к мостовой схеме, питаемой от стабилизированного источника пере- менного или постоянного тока. По значению тока небаланса моста и судят о значении измеряемого давления.

На таком принципе работают тензометрические манометры с преобразователями типа ТДДМ, ТДД-2, ЛХ-415, характеристики которых приведены в таблице 24.2. Преобразователи этого типа име- ют хорошую частотную характеристику в диапазоне от 0 до 2000 Гц, стабильную статическую характеристику, но уровень входного сигнала довольно низкий.

24.2. Техническая характеристика тензометрических преобразователей давления

Тип	Область применения	Верхние пределы из- мерения, МПа	Частот- ный диа- пазон, Гц	Схема вклюече- ния дат- чика
ТДДМ	Для измерения пульсиру- ющего избыточного дав- ления жидкости и газа	0,1; 0,2; 0,5; 0...1000 1; 2,5	0...1000	Полумост
ТДД-2	То же	0,1; 0,2; 0,5; 0...1000 1; 4; 10; 25; 40	0...1000	Полу- мост, мост
ЛХ-415	Для измерения быстро- изменяющегося давления жидких и газообразных сред (допускается дли- тельный нагрев мембраны до 200°C)	1; 1,5; 2; 3; 0...500 4	0...500	Мост

24.3. Как измерить отрицательное избыточное давление?

Для измерения давления разреженного воздуха большое распр- странение получили электрические вакуумметры с термоспро- тивлением и термопарой типа ЛТ-2. Принципиальная схема элект- рического вакуумметра показана на рисунке 24.3, б. Термоспро- тивление 7 выполнено из платиновой проволоки. К его середине приварена (рабочим концом) хромель-копелевая термопара 8, сво- бодные концы которой замкнуты на измерительный прибор 9. При протекании по термосопротивлению рабочего тока на свободных концах термопары появляется термо-ЭДС, значение которой зависит от силы тока и давления разреженного воздуха. Для обеспечения линейности характеристики преобразователя необходимо обеспе- чить постоянство тока подогревателя, например при помощи ста- билизированного источника питания и переменного резистора R.

25.1. Как измерить скорость движения воздуха?

Наиболее простой и удобный прибор для измерения скорости движения воздуха — анемометр, имеющий вертушку определенной конструкции. Под действием движущегося воздуха вертушка приходит во вращение с частотой, пропорциональной скорости движения воздуха. Движение на ее оси необходимо зафиксировать или преобразовать в электрическую величину, которую можно измерить электрическим прибором. Для этого на оси вертушки можно закрепить постоянный магнит, который при вращении может пересекать

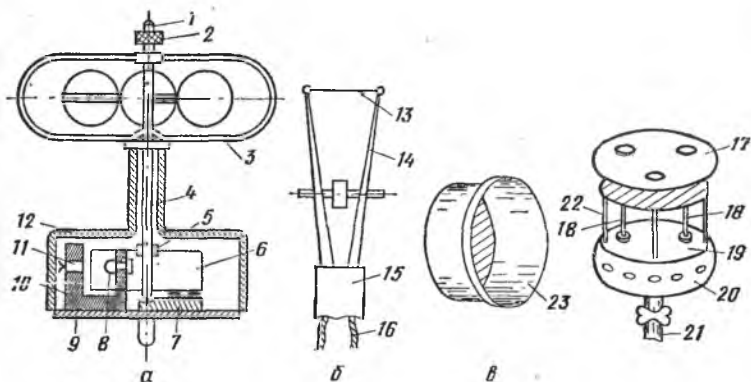


Рис. 25.1. Устройства для измерения скорости воздуха:

a — дистанционный анемометр с фотопреобразователем; *б* — термоанемометр тонкой платиновой нитью; *в* — термоанемометр с двумя терморезисторами.

катушку, расположенную рядом, и наводить в ней ЭДС. Вместо катушки можно установить геркон, тогда при приближении магнита его контакты будут замыкаться и размыкаться при удалении магнита. Если контакты установить в цепи постоянного тока, то можно наблюдать за частотой возникающего в цепи пульсирующего тока или записать этот ток на самопишущем или регистрирующем приборе во времени.

Вместо геркона может быть установлен фотоэлемент или фоторезистор, осветительная лампа и прерыватель светового потока, укрепленный на оси вертушки. Пример такого датчика показан на рисунке 25.1, *a*. Датчик состоит из вертушки, насаженной на ось 4 с игольчатым подшипником на конце. На верхней части защитной рамки 3 укреплен шариковый опорный подшипник с зажимным винтом 1 и контргайкой 2. В корпусе 12 размещены фотодиод 11 и осветительная лампа 8, укрепленные на держателе 10, жестко скрепленном с основанием 9. На этом же основании находится игольчатый подшипник 7. На оси вертушки при помощи втулки 5 закреплен прерыватель 6, выполненный в виде отрезка цилиндра с отвер-

стием. При вращении прерыватель 6 периодически перекрывает луч света, падающий от осветительной лампы 8 на фотодиод 11. При этом возникает сигнал в виде импульсов напряжения, пропорциональных скорости воздушного потока, который через усилитель регистрируется счетчиком.

Ко второй группе анемометров можно отнести приборы, принцип действия которых основан на связи между теплоотдачей нагретого тела и скоростью обтекающего его потока воздуха. Чувствительной частью такого прибора является тонкая металлическая проволока, нагреваемая электрическим током, по степени нагрева которой определяется искомая скорость воздушного потока.

На рисунке 25.1, б показана схема устройства термоанемометра, работающего на этом принципе. Преобразователь представляет собой тонкую платиновую нить 13, припаянную к двум манганиновым стержням 14, укрепленным на изоляционной ручке 15. Через ручку проходят выводные провода 16, при помощи которых датчик включают в измерительную цепь. Если сделать длину нити в 500 и более раз больше ее диаметра, то потери теплоты через теплопроводность проволоки будут минимальны и значение установившейся температуры будет пропорционально скорости движения воздуха или газа. Поэтому, если обеспечить постоянство тока, проходящего через термосопротивление, то значение скорости воздуха можно определять по значению измеренного сопротивления проволоки, предварительно проградуировав шкалу измерительного прибора в единицах измерения скорости потока. Такие анемометры имеют малую инерционность и используются для измерения мгновенного значения скорости воздушного или газового потока, но мало пригодны для измерения средней скорости.

25.2. В чем особенность анемометров, измеряющих среднюю скорость движения воздуха?

Для измерения усредненных значений скорости воздушного потока удобно использовать вместо металлической нити более массивные термосопротивления типа ММТ или КМТ (рис. 25.1, в). Чувствительной частью прибора являются два терморезистора 18 типа ММТ-6, представляющие собой стерженьки диаметром 0,6 мм и длиной 15 мм, покрытые защитным лаком. На их боковую поверхность намотаны нагревательные спирали из манганиновой проволоки диаметром 0,05 мм. Терморезисторы устанавливаются вертикально между двумя дисками 19 из дюралюминия, последние соединены между собой стойками 22 диаметром 0,3 мм. Сверху датчик имеет защитный диск 17 для предохранения от перегрева солнечными лучами. Устройство укреплено на металлическом основании 20. Штырь 21 с винтовой нарезкой служит для крепления прибора к столбу или дереву. При транспортировке датчик закрывают чехлом 23.

Принцип работы анемометра заключается в следующем. Через нагревательную обмотку анемометра из терморезисторов пропускают электрический ток постоянного значения с тем, чтобы выделяемая мощность (десятиные доли ватта) соответствовала тому значению, при котором градуировали прибор. Нагревательная обмотка второго терморезистора является компенсационной, она не обтекается током,

но находится в тех же температурно-влажностных условиях, что и обмотка рабочего датчика.

При движении воздуха нагретый терморезистор охлаждается в большей степени, чем компенсационный, в связи с чем по-разному изменяются и их сопротивления. Уловить разность сопротивлений двух терморезисторов можно, например, при помощи схемы дифференциального моста. Рассмотренный датчик имеет достаточно большую чувствительность при скорости движения воздуха до 3 м/с, особенно при скоростях, меньших 0,5 м/с. Постоянная времени 30 с.

25.3. Как измерить расход жидкости или газа!

Количество вещества, протекающего по трубопроводу в единицу времени, называется расходом, а приборы, измеряющие расход, — расходомерами.

Из большого числа расходомеров к электрическим можно отнести индукционные и ультразвуковые.

Индукционные расходомеры (рис. 25.2, а) имеют в своей основе индукционный преобразователь, выполненный из магнитопровода

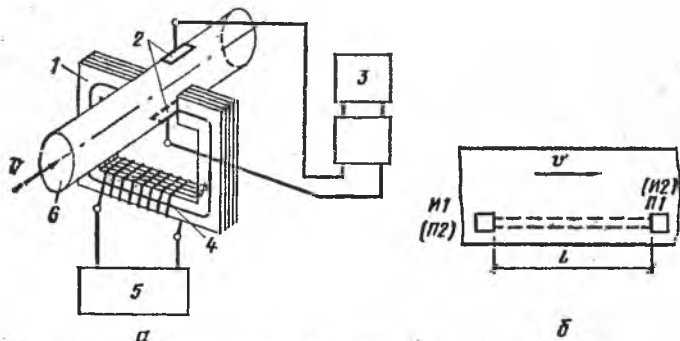


Рис. 25.2. Принципиальная схема расходомеров:

а — индукционного; б — ультразвукового.

1 с намотанной на него катушкой 4. При пропускании тока через катушку от источника питания 5 в магнитопроводе возникает магнитный поток Φ . В воздушном зазоре магнитопровода расположен трубопровод 6 из немагнитного материала для пропускания через него проводящей жидкости, расход которой требуется измерить. На корпусе трубопровода закреплены электроды 2.

При пропускании через трубопровод проводящей жидкости в ней по закону электромагнитной индукции наводится ЭДС, значение которой прямо пропорционально скорости движения потока жидкости и может быть измерено вторичным прибором 3 со шкалой, отградуированной в единицах расхода жидкости.

Индукционные расходомеры обладают незначительной инерционностью, позволяющей измерять расходы даже агрессивных жидкостей в широком диапазоне — от 1,25 до 400 м³/м. В индукционном расходомере нет частей, находящихся внутри трубопровода и препятствующих движению жидкости.

Один из недостатков индукционных датчиков расхода — влияние паразитных ЭДС и явление поляризации электродов, изменяющее его сопротивление. С целью уменьшения влияния последнего электроды изготавливают платиновыми, танталовыми, каломелевыми или угольными.

Промышленность выпускает индукционные расходомеры типов ИР-61, ЭРИС, «Индукция-М». Основная погрешность не превышает $\pm 1,0 \dots \pm 1,6 \%$.

Электромагнитный расходомер ИР-61 имеет пределы измерений от 0 до $4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$, «Индукция-М» — от 400 до 5000 $\text{м}^3/\text{ч}$ с основной погрешностью $\pm 1 \%$, а ЭРИС — от 400 до 12 500 $\text{м}^3/\text{ч}$ с основной погрешностью $\pm 1,5 \dots \pm 2,5 \%$.

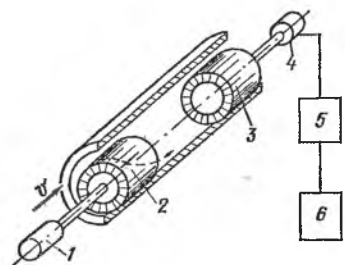


Рис. 25.3. Схема массового турборасходомера.

Принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на том, что фактическая скорость распространения ультразвука в движущейся среде газа или жидкости равна геометрической сумме средней скорости движения среды и собственной скорости звука в этой среде. Чувствительным элементом датчика (излучателя и приемника) является пьезоэлемент — прямоугольная кварцевая пластинка с плоскопараллельными гранями, обладающая свойствами

прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта. Если к одним противоположным граням пьезоэлемента подключить напряжение, то под действием электрического поля на двух других противоположных гранях возникнут механические колебания. И наоборот, если на одних гранях возбуждать механические колебания, то на противоположных возникнет пьезо-ЭДС. Ультразвуковой расходомер ИРУ-63 имеет датчик, электронный блок и регистрирующий прибор.

Принципиальная схема прибора (рис. 25.2, б) включает излучатель И1, создающий ультразвуковые колебания частотой от 20 кГц и выше, и приемник П1, регистрирующий эти колебания, расположенный от излучателя на расстоянии L . Достоинства ультразвукового расходомера — высокое быстродействие, надежность датчиков (излучателей и приемников), принципиальная возможность измерения расхода любых жидкостей и газов, в том числе и неэлектропроводных.

В массовом турборасходомере (рис. 25.3) ведущая турбинка 2, вращаемая с постоянной частотой ω синхронным экранированным электродвигателем 1, закручивает поток измеряемой жидкости, создавая в нем инерционный момент, пропорциональный массовому расходу Q . Измеряемый закрученный турбулентный поток, проходя через ведомую турбинку 3, жестко связанную с упругим элементом 4, разворачивает ее на определенный угол φ , пропорциональный измеряемому расходу. Угол поворота можно преобразовать в электрическое напряжение или ток, например при помощи проволочных преобразователей, которые после усиления (усилителем 5) могут быть измерены каким-то вторичным прибором 6.

Погрешность измерения таких турборасходомеров лежит в пределах $0,5 \dots 1 \%$ от верхнего предела измерений.

26.1. Какие бывают погрешности измерений?

Основными характеристиками результата измерений являются **точность** и **достоверность**. Точность измерений определяет их качество и уменьшается с увеличением погрешностей. Достоверность измерений характеризует степень доверия к полученным результатам. Обычно стремятся к тому, чтобы погрешность измерений не превышала заданных границ с необходимой достоверностью.

Погрешности измерений делят на **систематические** и **случайные**. Кроме них, в процессе измерения могут появиться **грубые погрешности**, то есть существенно превышающие ожидаемые при данных условиях. Обычно грубые погрешности при обработке результатов измерений не учитывают.

В зависимости от причины возникновения различают следующие погрешности: **инструментальные**, то есть зависящие от погрешностей применяемых средств измерений (см. п. 1.3); **метода измерений**, обусловленные несовершенством метода измерений; **отсчитывания**, происходящие от недостаточно точного отсчитывания показаний средств измерений; **интерполяции при отсчитывании**, возникающие от недостаточно точного оценивания на глаз деления шкалы, соответствующей положению указателя; от **параллакса**, происходящие вследствие визирования стрелки, расположенной на некотором расстоянии от поверхности шкалы в направлении, перпендикулярном поверхности шкалы.

По форме выражения рассматривают **абсолютные погрешности**, то есть представленные в единицах измеряемой величины, и **относительные**.

26.2. Как оценить и исключить систематические погрешности измерений?

Систематические погрешности измерений не зависят от числа измерений и при повторных измерениях остаются постоянными или изменяются по определенному закону, искажая результат. При наличии систематической погрешности в полученный результат измерений вносят поправку, а если систематическую погрешность нельзя исключить, то оценивают ее границы.

Систематические погрешности подразделяются на **инструментальные**, погрешности метода, в том числе и вызываемые влиянием самих средств измерений на измеряемую цепь, погрешности отсчитывания и возникающие при изменении влияющих величин, например температуры окружающей среды, магнитных полей, напряжения питания и т. п., погрешности считывания.

Существуют следующие способы исключения и учета систематических погрешностей.

1. Устранение источников погрешностей до начала измерений путем регулировки или ремонта средств измерений, удаления средства измерений от источника погрешности (например, источника теплоты или внешних магнитных полей), стабилизации напряжения, правильной установки прибора (указывается в технической документации).

2. **Исключение погрешностей** в процессе измерений способами замещения, компенсации погрешности по знаку, противопоставления, симметричных наблюдений. Способ замещения заключается в том, что измеряемый объект заменяют известной мерой, находящейся в тех же условиях. Погрешность измерения при этом зависит от погрешности меры и случайной составляющей погрешности. Постоянные составляющие погрешности при этом исключаются.

Способ компенсации заключается в том, что измерение проводят дважды так, чтобы неизвестная по размеру погрешность входила в результаты измерений с противоположным знаком, тогда при вычислении среднего значения двух измерений систематическая погрешность исключается. Число измерений может быть больше двух, но обязательно четным. Способ применяют только для исключения погрешностей, источники которых имеют направленное действие. Так можно исключить влияние магнитных полей, магнитного гистерезиса и т. п.

Способ противопоставления заключается в том, что измерения проводят два раза, причем так, чтобы причина, вызывающая погрешность при первом измерении, оказала противоположное действие на результат второго. Применяют этот способ в основном при сравнении измеряемой величины с мерой примерно равного значения. Например, сопротивление r_x измеряют при помощи равноплечего моста, в котором в каждом из плеч r_2 и r_3 сопротивления равны 1000 Ом. Равновесие достигнуто при $r_1 = 1000,4$ Ом. После перемены местами r_x и r_1 равновесие достигнуто при $r_1' = 1000,2$ Ом, тогда $r_x = (1000,4 + 1000,2)/2 = 1000,3$ Ом.

Способ симметричных наблюдений применяют для исключения погрешности, являющейся линейной функцией другой величины, например времени. Измерение проводят последовательно через одинаковые интервалы времени, а при обработке используют свойство результатов любых двух измерений, симметричных относительно средней точки интервала наблюдений. Свойство состоит в том, что погрешность результатов любой пары симметричных наблюдений равна погрешности, соответствующей средней точке интервала. Например, выполнено пять измерений, начаты в момент времени t_1 , погрешность при этом имела значение δ_1 , тогда $(\delta_1 + \delta_5)/2 = (\delta_2 + \delta_4)/2 = \delta_3$.

3. **Внесение известных поправок в результат измерения.** Если поправка по числовому значению равна систематической погрешности и противоположна ей по знаку, то ее прибавляют к результату измерений. Если поправка является поправочным множителем, то погрешность исключают умножением результатов измерений на поправочный множитель. Значение поправок и поправочных множителей определяют в результате поверки средства измерений.

26.3. Как оценить и исключить случайные погрешности прямых измерений!

Составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины, называется случайной погрешностью.

Для исключения случайной погрешности измерения проводят неоднократно, причем чем больше измерений, тем меньше значение

погрешности. Так как случайные погрешности устранить практически невозможно, то обычно оценивают границы случайной погрешности.

Результат измерений при этом записывают обычно в виде

$$\bar{x}; \Delta \text{ от } -\Delta_1 \text{ до } +\Delta_2, P_d,$$

где $-\Delta_1, +\Delta_2$ — границы доверительного интервала; P_d — заданная доверительная вероятность.

Например, $I=5,3$ А, ΔI от $-0,2$ до $+0,4$ А, $P_d=0,95$. Это означает, что измеренное значение силы тока равно $5,3$ А, погрешность измерения заключена между $-0,2$ и $+0,4$ А с вероятностью $0,95$, то есть истинное значение силы тока с вероятностью $0,95$ лежит в пределах от $5,1$ до $5,7$ А.

При распределении случайных погрешностей по нормальному закону распределения случайных величин и при заданной доверительной вероятности $P_d [|\bar{x}-a|<\Delta]=\Phi(t)$ доверительный интервал $\pm\Delta$ определяют по формуле

$$\Delta = t\sigma/\sqrt{n}.$$

Здесь \bar{x} — среднее арифметическое n наблюдений; a — истинное значение измеряемой величины; $\Phi(t)$ — интеграл вероятностей; t — коэффициент, определяемый по таблицам интегралов вероятностей; σ — среднее квадратическое отклонение измерений; n — число наблюдений.

Среднее арифметическое \bar{x} измерений величины x определяют по формуле

$$\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n = \sum_1^n x_i/n,$$

где x_i — результат i -го наблюдения.

Среднее квадратическое отклонение измерений можно определить как

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}.$$

Доверительную вероятность выбирают в зависимости от конкретных условий. В технической практике обычно $P_d=0,95$. Если измерения нельзя повторить, то $P_d=0,99$. Часто пользуются также доверительным интервалом $\pm 3\sigma$, для которого доверительная вероятность составляет $0,9973$, или $99,73\%$, что означает, что $99,73\%$ результатов измерений не выйдут за пределы доверительного интервала.

При равномерном распределении вероятностей принимают $P_d=1$, а $\pm\Delta=\pm 1,73\sigma$.

При вычислении значений среднего арифметического и среднего квадратического отклонений можно воспользоваться микрокалькуляторами МК-56, МК-54, БЗ-34, БЗ-21.

Программа для МК-56, БЗ-34:

Сх по П1 П4 С/П Fx² FBX ИПО + ПО \pm ИП1 + П1 КП4
ИПО ИП4 БП 04 : ПО С/П ИП1 ИП4 : ИПО Fx² — П1 С/П

Инструкция к программе. Ввести программу в микрокалькулятор; очистить сумматоры, нажав клавиши $B/0$ и C/P . Набрать на индикаторе очередное число x_i , нажать клавишу C/P . Если исходные данные исчерпаны, вычислить \bar{x} , нажимая последовательно клавиши $BП$, 19 , C/P . Вычислить σ_x^2 , нажав клавишу C/P . Вычисленные значения \bar{x} и σ_x^2 хранятся в регистрах соответственно 0 и 1 . Чтобы получить их на индикаторе, нужно нажать клавиши соответственно $ИПО$ и $ИП1$.

Программа для БЗ-21:

C/P $P2$ \uparrow $F4$ $+$ $P4$ $F5$ \uparrow $F2$ Fx^2 $+$ $P5$ $F3$ \uparrow 1 $-$ $P3$ $PX-0$
 $P0$ $F4$ \uparrow $F7$ \div $P4$ $F7$ \uparrow 1 $-$ $P3$ $F4$ Fx^2 \uparrow $F7$ \times $| - |$ \uparrow
 $F5$ $+$ \uparrow $F3$ $+$ $P5$ FV $P6$ C/P

Инструкция к программе. Ввести программу в микрокалькулятор. Нажать клавишу $B/0$; набрать на индикаторе число 0 и нажать клавиши $P4$, $P5$, $P6$. Набрать на индикаторе число n и нажать клавиши $P3$, $P7$. Поочередно набирая на индикаторе числа x_i , нажимать клавишу C/P . Если исходные данные исчерпаны, снова нажать клавишу C/P . В конце расчетов \bar{x} находится в регистре 4 , σ_x^2 — в регистре 5 , σ_x — в регистре 6 . Чтобы получить их на индикаторе, нужно нажать соответственно клавиши $F4$, $F5$, $F6$.

Рассмотрим пример. Пусть в результате двадцати измерений получены значения x_i , равные 2,6; 2,8; 2,9; 2,8; 2,6; 2,7; 2,8; 2,8; 2,6; 2,9; 2,8; 2,6; 2,8; 2,9; 2,6; 2,7; 2,8; 2,8; 2,6; 2,9 А. Тогда среднее значение $\bar{x}=2,75$, а среднее квадратическое отклонение $\sigma_x=0,01$ А. Необходимо определить:

1) пригоден ли данный метод для проведения однократных измерений с допускаемой погрешностью $\pm 0,5\%$ при доверительной вероятности, равной 0,9973;

2) какова будет погрешность при однократных измерениях и доверительной вероятности, равной 0,96;

3) каков доверительный интервал для десяти измерений и доверительной вероятности, равной 0,999.

1. Для $\Phi(t)=0,9973$ $t=3$. Для однократного измерения $n=1$, тогда $\pm \Delta = \pm 3 \sigma = \pm 3 \cdot 0,01 = 0,03$ А или в относительных единицах $\pm \Delta = \pm 0,03/2,75 = \pm 0,0109$, или $\pm 1,09\%$ от \bar{x} . Так как $1,09\% > 0,5\%$, то метод непригоден для однократных измерений с заданной точностью.

2. Для $\Phi(t)=0,96$ $t=2,054$; $\pm \Delta = \pm 2,054 \sigma_x = \pm 0,02$ А, или $\pm 0,74\%$ от \bar{x} , то есть метод пригоден для измерений, для которых погрешность с доверительной вероятностью, равной 0,96, не должна превышать 0,74%.

3. Для $\Phi(t)=0,999$ $t=3,291$; $\sigma_0 = \sigma_x/\sqrt{n} = 0,01/\sqrt{20} = 0,005$ А, тогда $\pm \Delta = \pm 0,005 \cdot 3,291 = \pm 0,016$ А.

При малом числе наблюдений ($n \leq 20$) пользуются значениями коэффициентов Стьюдента t_C , приведенными для различных доверительных вероятностей P_d и различного числа измерений (табл. 26.1).

В книгах по теории вероятностей чаще указывается не число наблюдений n , а число степеней свободы $k=n-1$, а вместо доверительной вероятности P_d — «уровень значимости», равный $1 - P_d$. Зная число наблюдений и задавшись значениями P_d , определяют

26.1. Значения доверительных вероятностей P_d

n	Значения P_d при t_C			
	2	2,5	3	3,5
2	0,705	0,758	0,759	0,823
3	0,816	0,870	0,905	0,928
4	0,861	0,912	0,942	0,961
5	0,884	0,933	0,960	0,975
6	0,898	0,946	0,970	0,983
7	0,908	0,953	0,976	0,987
8	0,914	0,959	0,980	0,990
9	0,919	0,963	0,983	0,992
10	0,923	0,966	0,985	0,993
11	0,927	0,969	0,987	0,994
12	0,929	0,970	0,988	0,995
13	0,931	0,972	0,989	0,996
14	0,933	0,974	0,990	0,996
15	0,935	0,974	0,990	0,996
16	0,936	0,975	0,991	0,997
17	0,937	0,976	0,992	0,997
18	0,938	0,977	0,992	0,997
19	0,939	0,978	0,992	0,997
20	0,940	0,978	0,993	0,997
∞	0,955	0,988	0,997	0,9995

из таблицы 26.1 значение t_C , а умножив его на $\sigma_0 = \sigma_x / \sqrt{n}$, определяют границы доверительного интервала.

Например, при пяти измерениях сопротивления получены значения 33,86; 33,78; 33,79; 33,84; 33,85 кОм. Определим доверительный интервал для среднего при доверительной вероятности, равной 0,96. Вычислив $\bar{x} = 33,82$ кОм и $\sigma = 0,37$ кОм; $\sigma_0 = 0,16$ кОм, по таблице 27.1 находим для $n=5$ и $P_d=0,96$ $t_C=3$, тогда $\pm \Delta = \pm \sigma_0 t_C = \pm 0,16 \cdot 3 = \pm 0,48$ кОм. Следовательно, сопротивление равно $33,82 \pm 0,48$ кОм при $P_d \approx 0,96$.

26.4. Как оценить погрешность косвенных измерений?

При косвенных измерениях измеряемую величину x определяют на основании измерений некоторых других величин (a, b, c, \dots). Например, при измерении сопротивления методом вольтметра и амперметра измеряют силу тока и напряжение, а по их значениям определяют значение сопротивления. Среднее значение измеряемой величины находят по формуле

$$\bar{x} = f(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots),$$

где $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots$ — средние значения величин a, b, c, \dots .

Среднее квадратическое отклонение измеряемой величины определяется из формулы

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 \sigma_b^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c}\right)^2 \sigma_c^2 + \dots}$$

где $\partial f/\partial a$ — частные производные, взятые в точке, соответствующей полученным результатам прямых измерений; σ_a — среднее квадратическое отклонение результата измерения величины a .

Например, определить сопротивление двух параллельно включенных резисторов, сопротивление которых $r_1 = 12 \pm 1,0$ Ом; $r_2 = 15 \pm 0,5$ Ом.

Так как $\bar{r} = \overline{r_1 r_2} / (\bar{r}_1 + \bar{r}_2)$, то $\bar{r} = 6,67$ Ом;

$$\frac{\partial r}{\partial r_1} = \left(\frac{\bar{r}_2}{\bar{r}_1 + \bar{r}_2}\right)^2 = 0,31 \text{ Ом}; \quad \frac{\partial r}{\partial r_2} = \left(\frac{\bar{r}_1}{\bar{r}_1 + \bar{r}_2}\right)^2 = 0,2 \text{ Ом};$$

$$\sigma_r = \sqrt{0,31^2 \cdot 1 + 0,2^2 \cdot 0,5^2} = 0,33 \text{ Ом}.$$

26.5. Как исключить грубые погрешности

Если в полученной выборке результатов измерений имеются один-два резко отличающихся от остальных, то необходимо проверить, нет ли описки, ошибки в снятии показаний. Если ошибок нет, то необходимо проверить статистическими методами, не являются ли наибольший и наименьший из результатов грубыми погрешностями. Для этого определяют значение v по формулам

$$v = (x_{\max} - \bar{x})/\sigma_x \quad \text{и} \quad v = (\bar{x} - x_{\min})/\sigma_x.$$

Вычисленные значения v сравнивают с табличными v_p (табл. 26.2).

26.2. Значения v_p в зависимости от доверительных вероятностей P_d и числа измерений n

n	v_p при P_d , равной				n	v_p при P_d , равной			
	0,9	0,95	0,975	0,99		0,9	0,95	0,975	0,99

3	1,406	1,412	1,414	1,414	9	2,097	2,237	2,349	2,464
4	1,645	1,689	1,710	1,723	10	2,146	2,294	2,414	2,540
5	1,731	1,869	1,917	1,955	11	2,190	2,383	2,470	2,606
6	1,894	1,996	2,067	2,130	12	2,229	2,387	2,663	2,663
7	1,974	2,093	2,182	2,265	13	2,264	2,426	2,562	2,714
8	2,041	2,172	2,273	2,374	14	2,297	2,461	2,602	2,759
					15	2,326	2,493	2,638	2,808

Если вычисленное значение v меньше табличного v_p , то гипотезу принимают. Если $v > v_p$, то гипотезу отвергают и результат x_{\max} (x_{\min}) из дальнейшей обработки результатов измерений исключают.

1. Барласов Б. З., Ильин В. И. Наладка приборов и систем автоматизации.— М.: Высшая школа, 1980.
2. Беляев Б. М., Фридман М. Н. Образцовые средства измерений напряжения и силы переменного тока, методы их поверки.— М.: Изд. стандартов, 1981.
3. Винокуров В. И., Каплин С. И., Петелин И. Г. Электрорадиоизмерения. Под ред. В. И. Винокурова.— М.: Высшая школа, 1986.
4. Генкин В. И., Митюшин Ю. Б. Электроника в сельском хозяйстве.— М.: Знание, 1981.
5. Голоднов Ю. М. Схемы включения электроизмерительных приборов.— М.: Энергия, 1979.
6. Голосов И. М. Применение лучистой энергии на животноводческих фермах и комплексах.— Л.: Лениздат, 1981.
7. Гольцман В. А. Приборы контроля и средства автоматизации тепловых процессов.— М.: Высшая школа, 1980.
8. Драксел Р. Основы электроизмерительной техники.— М.: Энергоиздат, 1982.
9. Жарковский Б. И. Приборы автоматического контроля и регулирования.— М.: Высшая школа, 1983.
10. Иванов А. И., Куликов А. А., Третьяков Б. С. Контрольно-измерительные приборы в сельском хозяйстве (справочник).— М.: Колос, 1984.
11. Кончаловский В. Ю. Цифровые измерительные устройства.— М.: Энергоиздат, 1985.
12. Кравцов А. В., Рыбинский Ю. В. Электрические измерения.— М.: Колос, 1979.
13. Новицкий В. А., Сергунов В. С. Автоматизация производственных процессов на элеваторах и зерноперерабатывающих предприятиях.— М.: Колос, 1981.
14. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений.— Л.: Энергоатомиздат, 1985.
15. Приборы контроля и управления влажностно-тепловыми процессами. Справочная книга /Сост. И. Ф. Бородин, С. В. Мищенко.— М.: Россельхозиздат, 1985.
16. Тюрин Н. И. Введение в метрологию.— М.: Изд. стандартов, 1985.
17. Хофман Д. Техника измерений и обеспечение качества. Справочная книга /Перевод с немец. под ред. Л. М. Закса, С. С. Кивилиса.— М.: Энергоатомиздат, 1983.
18. Электрические измерения /В. Н. Малиновский, Р. М. Демидова-Панферова, Ю. Н. Евланов и др.; Под ред. В. Н. Малиновского.— М.: Энергоатомиздат, 1985.
19. Электрические измерения /Под ред. А. В. Фремке.— Л.: Энергия, 1980.

Предисловие	3
Раздел первый. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА	5
Глава 1. Общие сведения о средствах измерений	5
1.1. Что такое средство измерений?	5
1.2. Какие параметры и свойства средств измерений следует учитывать при их выборе?	6
1.3. Какие бывают погрешности средства измерений?	7
1.4. Какие условные обозначения наносят на электроизмерительные приборы?	8
1.5. Что означает класс точности прибора?	10
1.6. Какие требования техники безопасности предъявляются к электроизмерительным приборам?	12
Глава 2. Магнитоэлектрические приборы	13
2.1. Как устроен магнитоэлектрический прибор?	13
2.2. Как работает магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой?	14
2.3. Какие достоинства и недостатки имеют магнитоэлектрические приборы?	15
2.4. Что такое гальванометры, где их применяют?	15
2.5. В чем заключается особенность магнитоэлектрических логометров?	16
Глава 3. Электромагнитные приборы	18
3.1. Как устроены электромагнитные приборы?	18
3.2. Как работают электромагнитные приборы?	18
3.3. Какие достоинства и недостатки имеют электромагнитные приборы?	20
3.4. В чем особенность электромагнитных приборов с высокой чувствительностью?	21
3.5. Как устроены и работают электромагнитные логометры?	21
Глава 4. Электродинамические и ферродинамические приборы	22
4.1. Как устроен электродинамический прибор?	22
4.2. Как работает электродинамический прибор?	22
4.3. Как включают катушки электродинамического прибора при измерении напряжения и тока?	23
4.4. Как включают катушки электродинамического прибора при измерении мощности?	24
4.5. В чем особенность ваттметра для измерения активной мощности в цепи переменного тока?	25
4.6. Какие достоинства и недостатки имеют электродинамические приборы?	26
4.7. В чем особенность электродинамического логометра?	26
4.8. Как устроены и работают ферродинамические приборы?	27

Глава 5. Индукционные приборы	28
5.1. Как устроен и работает индукционный прибор?	28
5.2. Как устроен и подключается индукционный счетчик электроэнергии?	29
5.3. Как работает индукционный счетчик электрической энергии?	30
5.4. Почему не весь магнитный поток Φ_2 направляют через алюминиевый диск?	32
5.5. Почему возникает самоход счетчика?	33
Глава 6. Электростатические приборы и приборы с преобразователями	33
6.1. Как устроен и работает электростатический прибор?	33
6.2. В чем особенность термоэлектрических приборов?	35
6.3. В чем особенность электроизмерительных приборов с полупроводниковым выпрямителем?	36
6.4. Что такое аналоговый электронный измерительный прибор (АЭИП)? Какие АЭИП выпускаются промышленностью?	38
6.5. Как устроен и работает электронный вольтметр?	39
6.6. Как классифицируются цифровые измерительные приборы? В чем их особенность?	41
6.7. Какие основные характеристики цифровых приборов следует учитывать при их выборе?	41
Глава 7. Самопишущие и регистрирующие приборы	43
7.1. Как устроены и работают самопишущие приборы?	43
7.2. Как устроен и работает электронно-лучевой осциллограф?	45
7.3. Какие основные характеристики электронно-лучевых осциллографов необходимо учитывать при их выборе?	47
7.4. Как устроены и работают светолучевые осциллографы?	48
7.5. Что необходимо учитывать при выборе светолучевых осциллографов?	49
Глава 8. Измерительные мосты	51
8.1. Как устроены и работают одинарные мосты постоянного тока?	51
8.2. Как устроен двойной мост постоянного тока?	53
8.3. В чем особенность мостов переменного тока?	54
8.4. Как работает автоматический мост?	55
8.5. В чем особенность неуравновешенных мостов постоянного тока?	56
Глава 9. Потенциометры	57
9.1. Как устроен и работает потенциометр постоянного тока?	57
9.2. В чем особенность потенциометров переменного тока?	58
9.3. Как работает автоматический потенциометр?	60
Глава 10. Преобразователи электрических величин в электрические	61
10.1. Как можно преобразовать электрическое напряжение при помощи резисторов?	61
10.2. Как можно преобразовать электрическое напряжение при помощи трансформаторов?	62

10.3.	Как можно преобразовать ток при помощи резисторов? Что такое шунт?	63
10.4.	Как устроен и работает измерительный трансформатор тока?	64
10.5.	Почему вторичную обмотку трансформатора тока нельзя оставлять разомкнутой?	65
Глава 11. Преобразователи неэлектрических величин в электрические		66
11.1.	Какие бывают преобразователи неэлектрических величин в электрические?	66
11.2.	Как устроены и работают индукционные преобразователи?	66
11.3.	Что такое датчик Холла и для чего его можно применять?	67
11.4.	Как устроен и работает фотоэлектрический преобразователь?	68
11.5.	Как работают пьезоэлектрические преобразователи?	69
11.6.	В чем особенность термоэлектрических преобразователей? Как устроены термоэлектрические термометры?	70
11.7.	Как устроены термометры сопротивления (терморезисторы)? Какие термометры сопротивления используют в измерительной технике?	73
11.8.	Что такое реостатный преобразователь и как его можно использовать?	75
11.9.	Как устроены проволочные преобразователи и где их можно применять?	76
11.10.	Как устроены и работают индуктивные преобразователи?	79
11.11.	В чем особенность емкостных преобразователей?	78
Раздел второй. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН		81
Глава 12. Измерение силы тока		81
12.1.	Какие методы измерения силы электрического тока применяют на практике?	81
12.2.	Как измерить силу постоянного тока компенсационным методом?	82
12.3.	Как правильно выбрать гальванометр для измерения малых постоянных токов?	82
12.4.	Как правильно рассчитать сопротивление шунта?	84
12.5.	Как правильно выбрать трансформатор тока для расширения пределов измерений приборов в цепях переменного тока?	85
12.6.	Как измерить силу тока повышенной и высокой частоты потенциометром переменного тока?	87
12.7.	В чем особенность измерения силы переменного тока в трехфазных сетях?	88
Глава 13. Измерение напряжений		88
13.1.	Какие методы измерения напряжения применяют на практике?	88
13.2.	Как правильно подобрать добавочный резистор для	

	расширения предела измерений вольтметра постоянного тока?	91
13.3.	Как измерить постоянное напряжение при помощи потенциометра постоянного тока?	92
13.4.	В чем особенность работы цифровых электронных вольтметров для измерения постоянного напряжения?	95
13.5.	Что необходимо знать при измерении больших напряжений приборами, подключенными через измерительный трансформатор напряжения?	97
13.6.	Как измерить напряжение в трехфазной сети?	97
13.7.	Как измерить напряжение в высоковольтной сети трехфазного переменного тока?	98
13.8.	Как измерить напряжение при помощи электронно-лучевого осциллографа?	100
Глава 14. Измерение мощности		101
14.1.	Как и какими средствами измерений можно измерить мощность в цепи постоянного тока?	101
14.2.	Как включить ваттметр в цепь постоянного тока?	103
14.3.	Как рассчитать сопротивления добавочного резистора и шунта для подключения ваттметра в цепь постоянного тока?	104
14.4.	Какими методами можно измерить активную мощность в однофазной цепи переменного тока?	105
14.5.	Как включить ваттметр в цепь переменного тока, если ток нагрузки больше допустимого?	106
14.6.	Как включить ваттметр в высоковольтную сеть переменного тока?	107
14.7.	Как измерить активную мощность в трехфазной трехпроводной сети?	107
14.8.	Как измерить активную мощность в трехпроводной сети, если нагрузка несимметричная?	108
14.9.	В чем особенность измерения мощности при помощи двух ваттметров?	109
14.10.	Как выполнены ваттметры для измерения активной мощности в трехфазной сети?	110
14.11.	Как измерить активную мощность в трехфазной четырехпроводной сети?	110
14.12.	Как измерить активную мощность в трехфазной высоковольтной цепи?	111
14.13.	Как устроен варметр для измерения реактивной мощности в трехфазной сети?	111
14.14.	Какими косвенными методами можно измерить реактивную мощность?	113
Глава 15. Измерение потребляемой электрической энергии		114
15.1.	Какими методами и какими средствами измерений можно измерить потребляемую электрическую энергию в цепи постоянного и однофазного переменного тока?	114
15.2.	Какие приборы применяют для измерения потребления активной электрической энергии в трехфазных цепях?	116
15.3.	Как включить трехфазный счетчик в низковольтную сеть с большим током?	117

15.4.	Как включить трехфазный счетчик активной электрической энергии в высоковольтную сеть?	118
15.5.	Какими средствами измерений и как измеряют потребление реактивной электрической энергии в трехфазной сети	118
Глава 16. Измерение активных сопротивлений		120
16.1.	Какие методы применяют на практике для измерения активных сопротивлений постоянному току?	120
16.2.	Как измерить активное сопротивление при помощи амперметра и вольтметра в цепи постоянного тока?	120
16.3.	Как устроен и работает омметр?	122
16.4.	Как устроен и работает мегомметр?	123
16.5.	Как измерить сопротивление при помощи мостов?	125
16.6.	Как измерить сопротивление при помощи одного вольтметра?	127
16.7.	Как измерить сопротивление заземления?	128
Глава 17. Измерение емкости, индуктивности и взаимной индуктивности		130
17.1.	Какие параметры конденсаторов и катушек индуктивности можно измерить электроизмерительным прибором?	130
17.2.	Как измерить индуктивность и добротность при помощи моста переменного тока?	132
17.3.	Какие косвенные методы измерения индуктивности и взаимной индуктивности можно применять?	134
17.4.	Как измерить емкость и угол потерь конденсаторов при помощи мостов?	136
17.5.	Как измерить емкость при помощи фарадометра?	136
17.6.	Как измерить емкость при помощи баллистического гальванометра?	137
17.7.	Как измерить емкость методом замещения?	138
17.8.	Какие косвенные методы измерения емкости можно применить?	138
Глава 18. Измерение коэффициента мощности и фазового сдвига		139
18.1.	Как измерить коэффициент мощности?	139
18.2.	Как измерить фазовый сдвиг и $\cos \varphi$ при помощи фазометра?	140
18.3.	Какие фазометры выпускает промышленность?	141
18.4.	Какими осциллографическими методами можно воспользоваться для определения фазового сдвига?	141
Глава 19. Измерение частоты тока		143
19.1.	Как и какими средствами можно измерить частоту тока?	143
19.2.	Как измерить частоту тока косвенным методом?	145
19.3.	Как измерить частоту методом заряда — разряда конденсатора?	147
19.4.	Как измерить частоту при помощи цифровых измерительных приборов?	147

Раздел третий. ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	153
Глава 20. Измерение температуры	153
20.1. Какими методами и средствами измерений пользуются при измерении температуры?	153
20.2. Как измерить температуру при помощи термоэлектрического термометра?	153
20.3. Как измерить температуру при помощи термометра сопротивления?	155
20.4. В чем особенность измерения температуры термометром сопротивления, вторичным измерительным прибором которого является уравновешенный мост?	156
20.5. Как использовать неуравновешенный мост для измерения температуры в комплекте с термометром сопротивления?	157
20.6. Какие автоматические мосты для измерения температуры выпускает промышленность? Как они работают?	159
20.7. В чем особенность измерения температуры термометром сопротивления в комплекте с магнитоэлектрическим логометром?	160
20.8. Как использовать диоды и транзисторы для измерения температуры?	162
20.9. Как измерить температуру тела животных?	163
20.10. Как измерить температуру воздуха в помещении?	165
20.11. Как можно измерить температуру пола в животноводческом помещении?	167
20.12. Как измерить температуру воды, молока и других жидкостей?	168
20.13. Как измерить температуру сена и силоса?	169
20.14. Как измерить температуру почвы?	170
Глава 21. Измерение влажности	172
21.1. Какие электрические методы измерения влажности твердых, сыпучих и жидких веществ получили распространение в агропромышленном комплексе?	172
21.2. Какими методами и средствами измерений можно измерить влажность зерна и других сыпучих материалов?	173
21.3. Как измерить влажность кормов и кормосмесей?	177
21.4. Как измерить влажность воздуха и газов?	178
Глава 22. Применение электрических средств измерений для анализа свойств и состава молока и кормосмесей	186
22.1. Какими методами можно определить качество смешивания кормов?	186
22.2. Какими электрическими методами можно измерить жирность молока?	190
22.3. Как измерить количество белка в молоке?	192
Глава 23. Измерение уровня	195
23.1. Какие электрические методы используются в агропромышленном комплексе для измерения уровня?	195
23.2. Как измерить уровень жидкости?	196
23.3. Как измерить уровень сыпучих материалов?	199

Глава 24. Измерение давления	202
24.1. Какие методы измерения давления используются в агропромышленном комплексе?	202
24.2. Как измерить положительное избыточное давление?	202
24.3. Как измерить отрицательное избыточное давление?	206
Глава 25. Измерение скорости воздуха и расхода газов и жидкостей	207
25.1. Как измерить скорость движения воздуха?	207
25.2. В чем особенность анемометров, измеряющих среднюю скорость движения воздуха?	208
25.3. Как измерить расход жидкости или газа?	209
Глава 26. Погрешности измерений	211
26.1. Какие бывают погрешности измерений?	211
26.2. Как оценить и исключить систематические погрешности измерений?	211
26.3. Как оценить и исключить случайные погрешности прямых измерений?	212
26.4. Как оценить погрешность косвенных измерений?	215
26.5. Как исключить грубые погрешности?	216
Указатель литературы	217

Борис Иваинович Панев

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

СПРАВОЧНИК (В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ)

Зав. редакцией *Н. М. Облезов*. Редактор *В. М. Никитина*. Художник *И. А. Слюсарев*. Художественный редактор *Е. Г. Прибегина*. Технический редактор *Н. В. Новикова*. Корректор *И. Н. Молодкина*.

ИБ № 4181

Сдано в набор 19.02.87. Подписано к печати 09.07.87. Т-09982. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура Литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 11,76. Усл. кр.-отт. 11,97. Уч.-изд. л. 15,31. Изд. № 327. Тираж 84 000 экз. Заказ № 932. Цена 60 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени ВО «Агропромиздат», 107807, ГСП, Москва, Б-53, ул. Садовая-Спасская, 18.

Набрано в 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.

Отпечатано с матриц во Владимирской типографии Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7.