

ГЛАВА VI  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

§ 44. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические измерительные приборы служат для измерения различных электрических величин: силы тока, напряжения, сопротивления, мощности, энергии, а также многих неэлектрических величин, в том числе температуры, давления, влажности, скорости, уровня жидкости, толщины материала и др.

В связи с тем, что абсолютно точных приборов нет, показания электроизмерительных приборов несколько отличаются от действительного значения измеряемых величин.

Разность между измеренным и действительным значением величины называется *абсолютной погрешностью прибора*. Если, например, в цепи сила тока  $I=10$  а, а амперметр, включенный в эту цепь, показывает  $I_{\text{изм}}=9,85$  а, то абсолютная погрешность показания прибора

$$\Delta A = I_{\text{изм}} - I = 9,85 - 10 = -0,15 \text{ а.} \quad (91)$$

*Приведенной погрешностью прибора*  $\gamma_{\text{пр}}$  называется отношение абсолютной погрешности  $\Delta A$  к наибольшему значению величины  $A_{\text{макс}}$ , которую можно измерить при данной шкале прибора:

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_{\text{макс}}} \cdot 100\%. \quad (92)$$

Приведенная погрешность прибора, находящегося в нормальных рабочих условиях (температура  $20^\circ\text{C}$ , отсутствие вблизи прибора ферромагнитных масс, нормальное рабочее положение шкалы и т. д.), называется *основной погрешностью прибора*.

**Пример.** Пусть при измерении силы тока  $I=4$  а в нормальных условиях использовался амперметр со шкалой 0—10 а и он показал, что сила тока в цепи 4,1 а. Вычислить основную (приведенную) погрешность прибора, характеризующую его точность.

**Решение:**

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_{\text{макс}}} \cdot 100 = \frac{4,1 - 4}{10} \cdot 100 = 1\%.$$

В зависимости от допускаемой основной погрешности электроизмерительные приборы делятся на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4.

Цифра класса точности показывает величину допускаемой основной (приведенной) погрешности  $\Delta A_{\text{макс}}$  прибора в процентах вне зависимости от знака погрешности.

Класс точности

$$K = \frac{\Delta A_{\text{макс}}}{A_{\text{макс}}} \cdot 100\% \quad (93)$$

Прибор, у которого класс точности выражен меньшим числом, позволяет выполнять измерения с большей точностью.

Зная класс точности прибора и наибольшее значение величины, которую можно измерить диапазоном шкалы прибора, можно определить наибольшую возможную абсолютную погрешность выполненного измерения:

$$\Delta A_{\text{макс}} = \pm \frac{KA_{\text{макс}}}{100} \quad (94)$$

Пример. Допустим, что наибольшая сила тока, которую можно измерить данным амперметром, составляет 15 а, а класс точности прибора  $K=4$ .

Определить наибольшую возможную абсолютную погрешность при выполнении измерения в любой точке шкалы.

Решение:

$$\Delta A_{\text{макс}} = \frac{KA_{\text{макс}}}{100} = \frac{4 \cdot 15}{100} = 0,6 \text{ а.}$$

Чем ближе измеряемая величина к наибольшему значению, которое позволяет измерить прибор, тем меньше погрешность при прочих равных условиях. Это обстоятельство следует учитывать при выборе предела измерения прибора для выполнения измерения.

Электроизмерительные приборы классифицируются по роду измеряемой величины, принципу действия, степени точности и роду измеряемого тока, кроме того, они делятся на эксплуатационные группы.

По роду измеряемой величины приборы делятся на амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, счетчики, электротермометры, электротаксометры (измеряющие число оборотов в минуту) и др.

По принципу действия измерительного механизма приборы могут быть следующих систем: электромагнитной, магнитоэлектрической, электродинамической, ферродинамической, индукционной, выпрямительной, термоэлектрической, электронной, вибрационной и электростатической.

В зависимости от рода тока, для измерения которого предназначены приборы, они делятся на приборы, измеряющие переменный ток, постоянный ток, и приборы, измеряющие переменный и постоянный ток.

Выпускают приборы трех основных эксплуатационных групп: А, Б и В. Условные обозначения электроизмерительных приборов разных эксплуатационных групп приведены в табл. 5.

Таблица 5

Условные обозначения электроизмерительных приборов  
По роду измеряемой величины

Название прибора	Измеряемая величина	Условное обозначение
Амперметр	Сила тока	Ⓐ
Вольтметр	Напряжение	Ⓥ
Омметр	Электрическое сопротивление	ⓞ
Ваттметр	Электрическая мощность	Ⓦ
Частотомер	Частота тока	ⓗз

По принципу действия прибора

Система прибора	Условное обозначение
Магнитоэлектрическая	Ⓜ

Система приборов	Условные обозначения
Индукционный	
Термоэлектрическая	
Выпрямительная	
Электромагнитная	
Электродинамическая	
Ферродинамическая	

По роду измеряемого тока

Род тока	Условные обозначения
Переменный	
Постоянный	
Переменный и постоянный	
Трёхфазный	

По положению прибора при измерении	
Положение прибора при измерении	Условные обозначения
Вертикальное	
Горизонтальное	
Под углом 30°	



## Применение групп приборов

Группа	Температура окружающего воздуха, °С	
A*	От 0 до +35	
B	От -30 до +40	
B	B <sub>1</sub>	От -40 до +30
	B <sub>2</sub>	От -50 до +60

Прочие обозначения	
Назначение	Условное обозначение
Класс точности, например, 1,5	1,5
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2000 в	☆
Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам	④
Год выпуска	1966
Заводской номер	21226
Эксплуатационная группа	△

\* Для группы A на шкале прибора не записывается.

На шкале каждого электронизмерительного прибора условными знаками указаны необходимые сведения о конструкции и эксплуатации прибора. Например, на шкале вольтметра (рис. 76) указано: вольтметр (V) электромагнитной системы; предназначен для измерения переменного напряжения (~) и пределах от 0 до 250 в; при измерениях напряжения прибор следует устанавливать вертикаль-

но (⊥); изоляция испытана напряжением 2 кВ (☆), класс

точности 1,5; заводской номер 5140; год выпуска 1966; эксплуатационная группа △.

К электронизмерительным приборам всех систем предъявляются следующие технические требования:

- точность и надежность в работе и низкая стоимость;
- потребление по возможности малой мощности;
- способность не вносить заметных изменений в электрические параметры измеряемой цепи;
- более равномерные деления в пределах рабочей части шкалы;
- способность выдерживать возможно большую перегрузку;
- продолжительный срок службы без ухудшения своих качеств;
- надежная изоляция токоведущих частей от корпуса;
- показания практически не должны зависеть от влияния внешних факторов;
- стрелки приборов должны быстро устанавливаться у соответствующего деления шкалы.

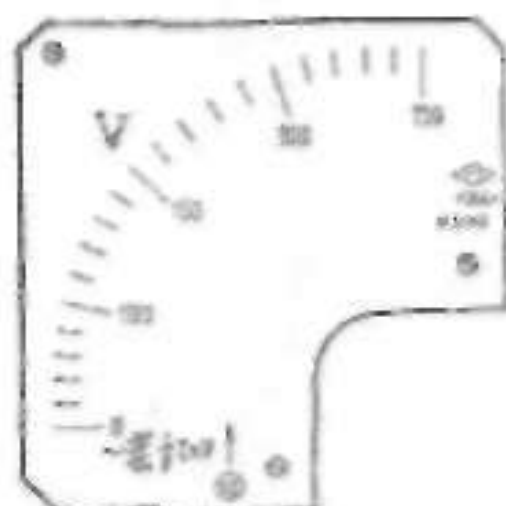


Рис. 76. Шкала вольтметра

## § 67. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

Устройство электромагнитного прибора с плоской катушкой показано на рис. 77. Неподвижная часть прибора представляет собой плоскую катушку 1 с обмоткой из изолированной медной проволоки. Концы обмотки присоединяются к зажимам прибора. Подвижная часть прибора имеет ось 4, установленную в подшипниках, на которой помещаются стальной сердечник, стрелка 7 и сегмент успокоителя 2, который находится в магнитном поле постоянного магнита 3. Спиральная пружина 5, создающая противодействующий момент, соединена одним концом с корректором 6, а другим — с осью. В вырезе корректора помещается эксцентричный штифт с головкой винта.

Когда по обмотке катушки протекает электрический ток, создается магнитное поле и стальной сердечник втягивается в катушку. В зависимости от силы тока в обмотке сердечник втягивается в катушку в большей или меньшей степени, поворачивая на некоторый угол ось со стрелкой.

Одновременно с увеличением отклонения подвижной части прибора возрастает противодействующий момент, создаваемый закручиванием спиральной пружины. При определенном положении

подвижной части измерительного прибора противодействующий момент полностью уравнивает вращающий момент, а стрелка по шкале прибора указывает измеряемую величину.

При включении тока стрелка под действием спиральной пружины *б* возвращается в исходное положение.

Втягивание сердечника происходит независимо от того, какой ток (постоянный или переменный) протекает по обмотке. В том и другом случае ток возбуждает магнитное поле, действующее на сердечник, а последний при переменном токе соответственно перемагничивается. Поэтому электромагнитные приборы пригодны для измерения как в цепях постоянного, так и в цепях переменного тока.

Для установки стрелки на нуль служит корректор *б*. При повороте эксцентричного штифта он действует на нижнее плечо корректора и отклоняет его. Верхняя часть корректора, перемещаясь, тянет за собой спиральную пружину, которая поворачивает ось вместе со стрелкой и устанавливает последнюю на нуль.

Чтобы при измерениях стрелка прибора возможно быстрее оставалась у соответствующего деления шкалы, предусмотрено специальное

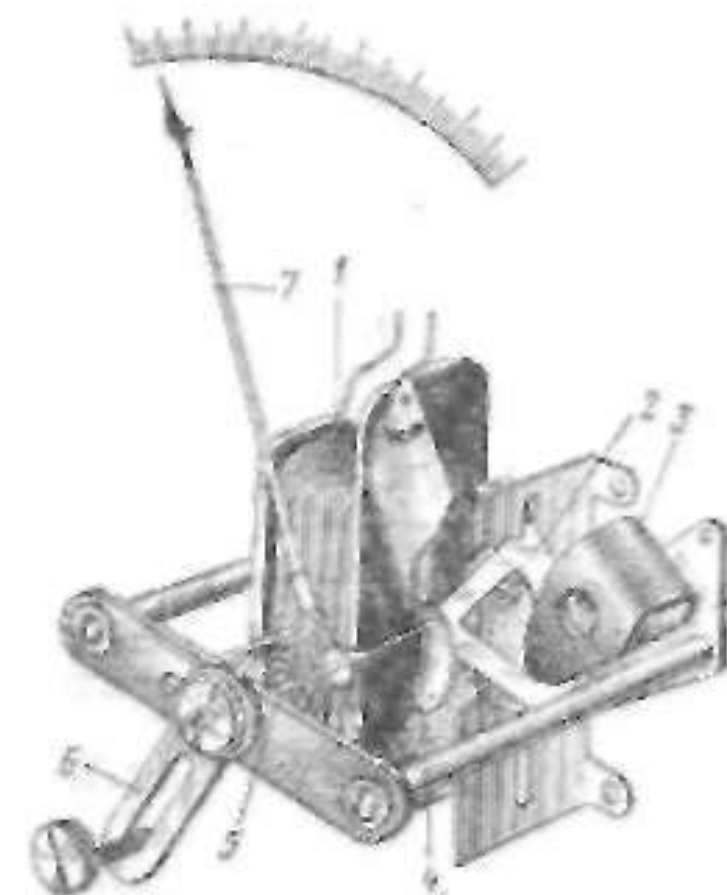


Рис. 77. Устройство электромагнитного прибора с плоской катушкой

устройство — успокоитель. Наиболее часто применяют магнитоиндукционные и воздушные успокоители.

Действие магнитоиндукционного успокоителя основано на использовании вихревых токов. При перемещении алюминиевого сегмента-успокоителя между полюсами постоянного магнита в сегменте возникают вихревые токи. Взаимодействие магнитного поля постоянного магнита и вихревых токов создает согласно правилу Ленца необходимое торможение (успокоение) сегмента, а следовательно, и всей подвижной части прибора со стрелкой.

Действие воздушного успокоителя основано на использовании сопротивления воздуха, которое встречает подвижное легкое крыло, перемещающееся внутри закрытого сосуда.

Конструкция электромагнитного прибора с круглой катушкой показана на рис. 78. Неподвижная часть прибора представляет собой круглую катушку с обмоткой. Внутри ее укреплен неподвижный стальной сердечник. Подвижной частью прибора служит ось, к которой прикреплен подвижный стальной сердечник. На оси уста-

новлена стрелка, перемещающаяся вдоль шкалы. С осью через спиральную пружину соединен корректор.

Когда по обмотке катушки протекает ток, концы сердечников намагничиваются с одинаковой полярностью и в результате этого подвижный сердечник, отталкиваясь от неподвижного, поворачивает ось со стрелкой на некоторый угол.

Электромагнитные приборы используются преимущественно для измерения переменных токов и напряжений промышленной частоты.

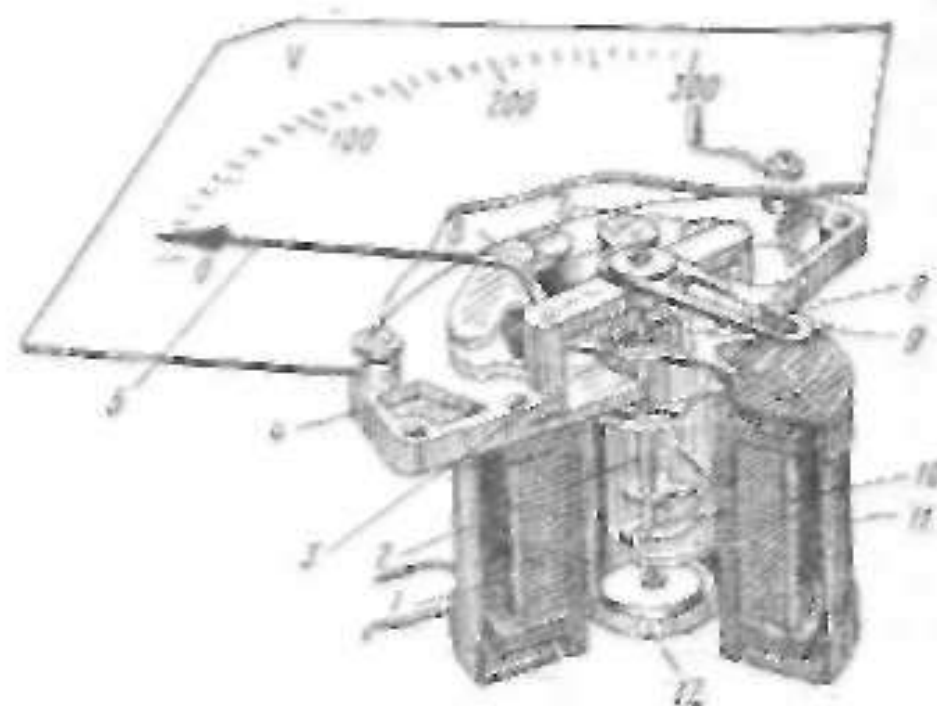


Рис. 78. Устройство электромагнитного прибора с круглой катушкой

1 — катушка, 2 — ось, 3 — пропеллерообразная пружина, 4 — обмотка с успокоителем, 5 — стрелка, 6 — эксцентрик-успокоителя, 7 — шкала, 8 — магниты успокоителя, 9 — пружиноподдержателя, 10 — корректор, 11 — вращающийся сердечник, 12 — алюминиевый стержень

К достоинствам этих приборов относятся простота устройства, дешевизна и надежность в эксплуатации, пригодность для измерения постоянного и переменного тока, высокая устойчивость к кратковременным перегрузкам. Недостатками их являются неравномерность начальной части шкалы, зависимость показаний от влияния внешних магнитных полей, сравнительно большая потребляемая мощность.

#### § 48. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Магнитоэлектрический прибор (рис. 79) состоит из постоянного магнита *N—S*, магнитопровода из мягкой стали *1*, полюсных наконечников *5*, стального цилиндра *8* и легкой алюминиевой рамки *7*, на которую намотана тонкая изолированная проволока. К рамке, установленной на двух полюсах, прикреплен стрелкодержатель *3* со стрелкой *2* и балластными грузиками *6*. Рамка связана с проти-



действующими пружинами 4. Для установки стрелки на нуль служит корректор.

Работа прибора основана на воздействии магнитного поля постоянного магнита на ток, протекающий по обмотке рамки, в результате этого рамка поворачивается в направлении, зависящем от направления тока.

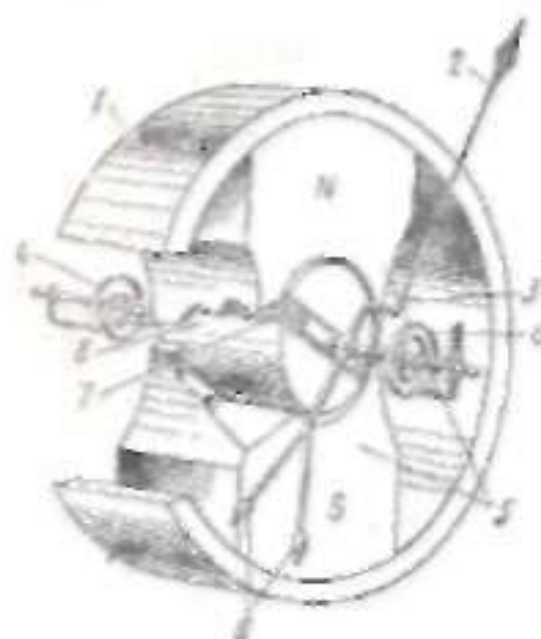


Рис. 79. Устройство магнито-электрического прибора

На зажимах приборов магнито-электрической системы имеются обозначения «+» и «-», которые указывают, как надо включать прибор, чтобы стрелка отклонилась вдоль шкалы.

При вращении алюминиевой рамки в магнитном поле постоянного магнита в рамке, как и в витке, индуцируется ток. Взаимодействие этого тока с магнитным полем обеспечивает усиление колебаний подвижной части прибора при ее отклонении.

К достоинствам приборов магнито-электрической системы относятся: высокая точность, малое собственное потребление мощности, равномерность шкалы, независимость показаний от влияния внешних магнитных полей; а к

недостаткам — непригодность для непосредственного измерения переменного тока, сравнительно высокая стоимость и чувствительность к перегрузкам.

#### § 49. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Термоэлектрические измерительные приборы служат преимущественно для измерения переменных токов высокой частоты (до 25 Мгц).

Принцип действия такого прибора основан на использовании двух явлений: 1) выделении тепла при прохождении электрического тока по проводнику; 2) появлении постоянной э. д. с. при нагревании места спая термопары.

Термоэлектрический измерительный прибор представляет собой сочетание гальванометра магнитоэлектрической системы с термопреобразователем, состоящим из нагревателя и термопары. Схема прибора термоэлектрической системы приведена на рис. 80.

Измеряемый переменный ток протекает по нагревателю 1, который выделяет тепло, нагревающее место спая 2 термопары. На холодных концах термопары образуется тер-

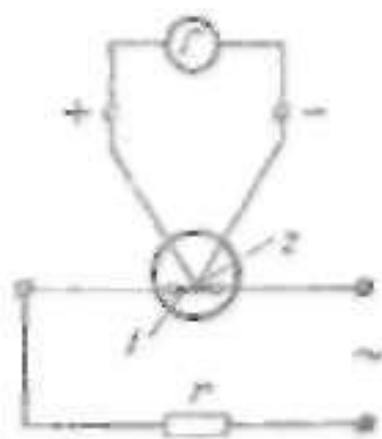


Рис. 80. Схема прибора термоэлектрической системы

мо-э. д. с., под действием которой в цепи гальванометра возникает измеримый им электрический ток. Нагреватель с термопарой называют термопреобразователем. Он помещается в одном корпусе с гальванометром или отдельно от него.

Так как величина термо-э. д. с., возникающей на холодных концах термопары, зависит от тока, протекающего по нагревателю, то стрелка гальванометра показывает по шкале, отградуированной в единицах тока, силу протекающего в цепи переменного тока.

Термоэлектрические приборы изготовляют в виде шитовых и переносных. Главным их недостатком является малая перегрузочная способность термопреобразователя — они выдерживают перегрузку по току примерно в 1,5 раза.

#### § 70. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Основными частями электродинамического прибора (рис. 81) являются: неподвижная катушка 2 и подвижная катушка 1, расположенная на оси 5, к которой прикреплена стрелка 6. Ось связана с алюминиевым крылом воздушного успокоителя 4, помещающегося в камере 3. Ток к подвижной катушке подводится через спиральные пружины 7, создающие противодействующий момент. С нижней пружиной соединен корректор 8.

Работа приборов электродинамической системы основана на взаимодействии токов в двух обмотках. Сила этого взаимодействия поворачивает подвижную обмотку вместе с осью и стрелкой. Угол поворота зависит от силы тока, протекающего по обмоткам, и силы противодействия спиральных пружин.

Электродинамические приборы можно применять в цепях постоянного и переменного тока. Это объясняется тем, что изменение направления переменного тока происходит одновременно в обеих катушках, вследствие чего направление силы взаимодействия между ними остается неизменным.

Электродинамические приборы употребляют для измерения силы тока, напряжения и мощности.

К преимуществам приборов этой системы наряду с возможностью использования их в цепях постоянного и переменного тока относится высокая точность. Недостатками их являются: влияние внешних магнитных полей на результаты измерения, большое

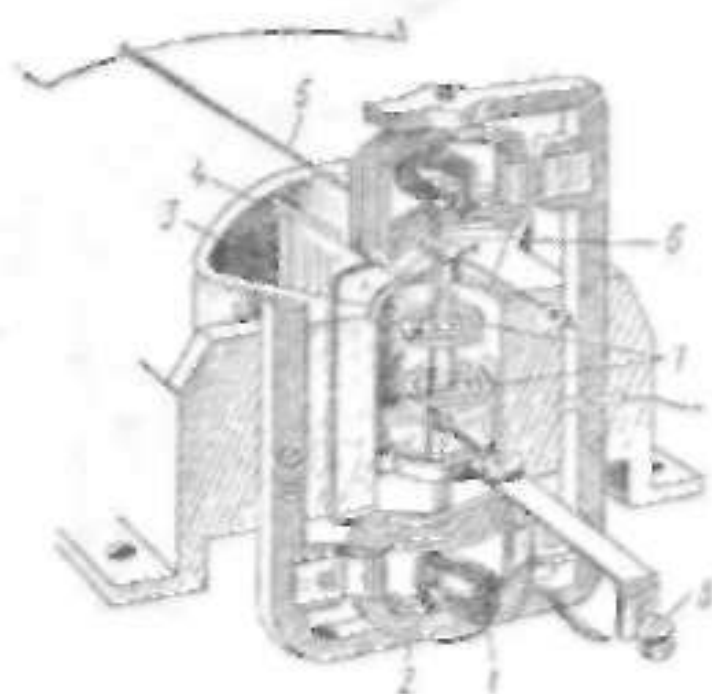


Рис. 81. Устройство электродинамического прибора



собственное потребление мощности, относительно малая устойчивость к перегрузкам, малая чувствительность и высокая стоимость.

Разновидностью приборов электродинамической системы являются широко распространенные, главным образом в качестве штыковых ваттметров, ферродинамические приборы (рис. 82), действие которых основано на том же принципе. Однако в отличие от приборов электродинамической системы у ферродинамических приборов

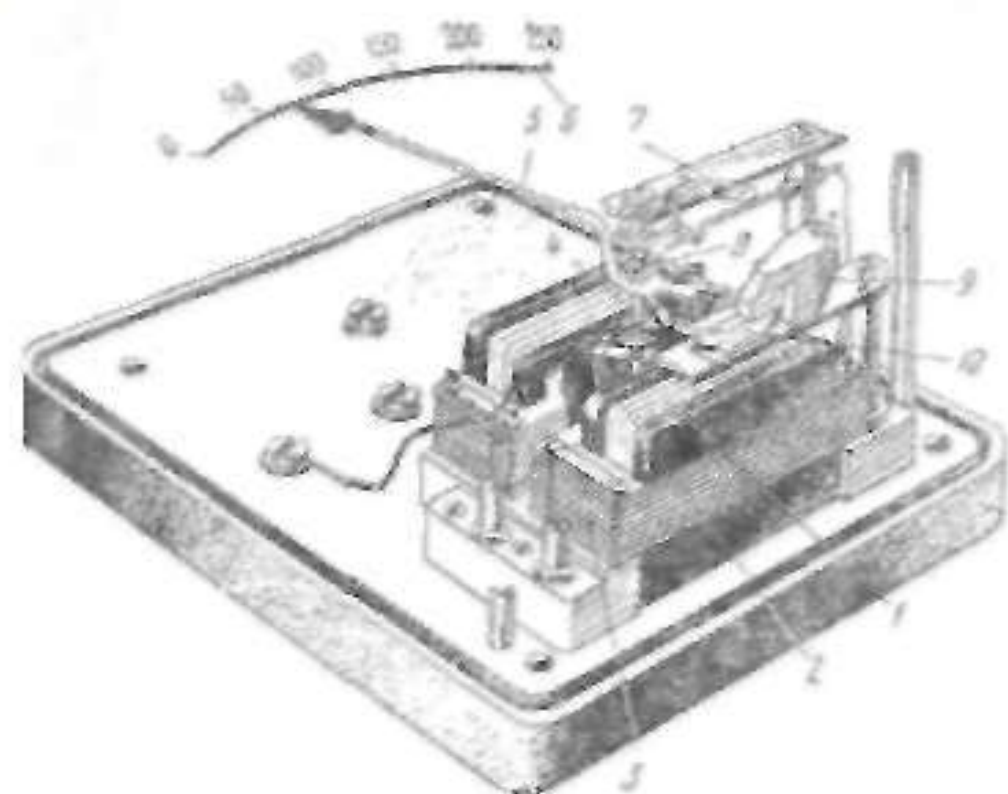


Рис. 82. Устройство ферродинамического прибора:  
1 — неподвижные обмотки, 2 — подвижные обмотки, 3 — стальной сердечник, 4 — ось, 5 — стрелка, 6 — шкала, 7 — корректор, 8 — противодействующая пружина, 9 — магнит усилителя, 10 — жемчужный сегмент усилителя

неподвижные обмотки помещаются на стальном сердечнике, который усиливает магнитное поле и вращающий момент прибора, а также уменьшает влияние внешних магнитных полей на его показания. Катушки электродинамических приборов соединяются между собой в зависимости от их назначения. В амперметрах катушки в большинстве случаев соединяют параллельно, в вольтметрах — последовательно, а в ваттметрах одна катушка включается в цепь последовательно, как амперметр, а другая — параллельно нагрузке, как вольтметр.

#### § 71. ИНДУКЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ

К приборам индукционной системы относится счетчик (рис. 83), служащий для учета потребления электрической энергии. Основная часть счетчика — магнитная система 1 с двумя обмотками. Одна обмотка включается в цепь последовательно, а другая — параллельно. Переменные токи, протекающие по каждой обмотке, возбуждают переменные магнитные потоки, которые образуют вра-

щающееся магнитное поле. Эти потоки пронизывают алюминиевый диск 6 счетчика и индуцируют в нем вихревые токи. Воздействие вращающегося магнитного поля, образованного магнитными потоками, на вихревые токи приводит диск во вращение. Ось 2 диска через шестерни 3 передает движение счетному механизму 4. Для торможения диска служит постоянный магнит 5.

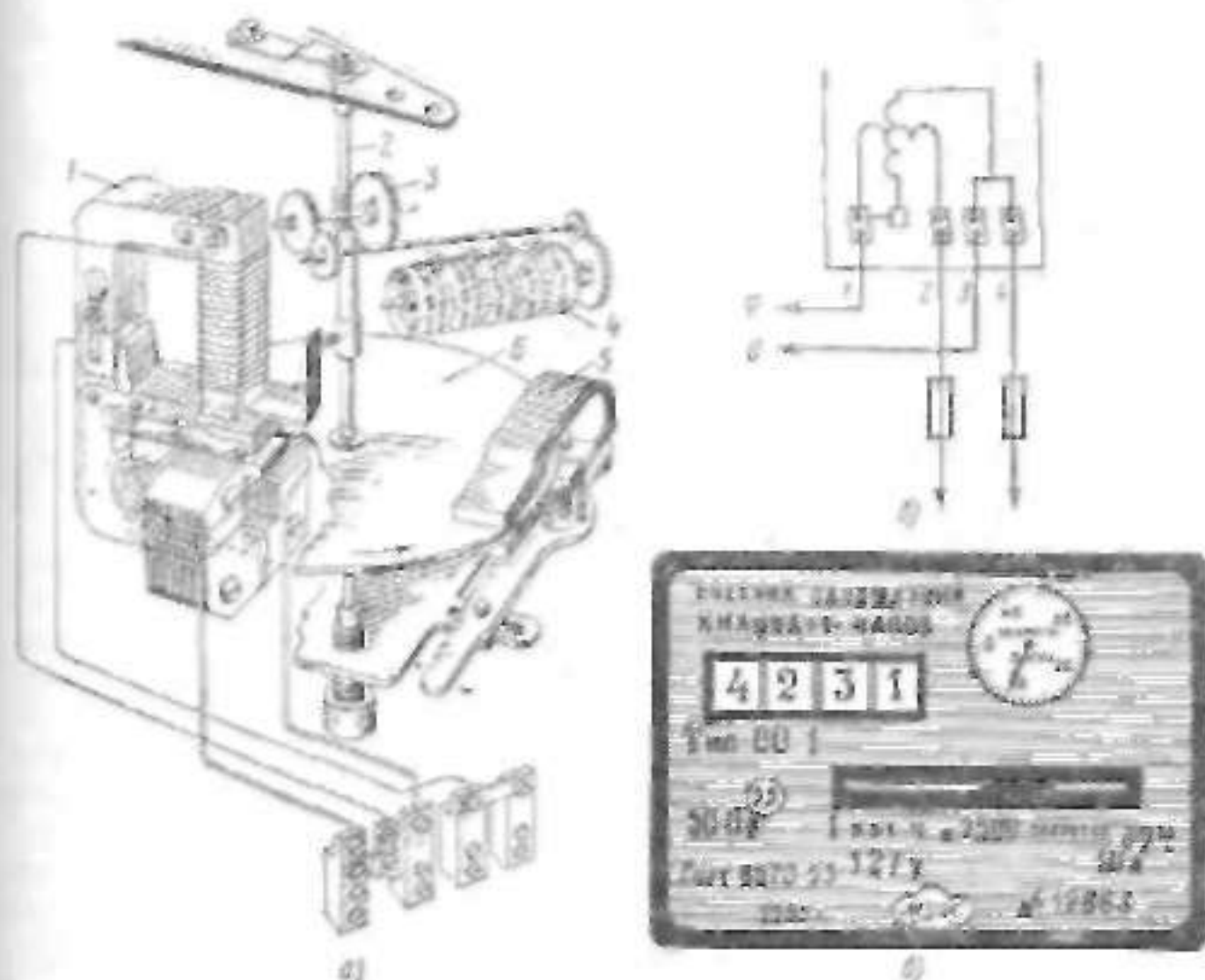


Рис. 83. Счетчик электрической энергии:  
а — устройство, б — шкала, в — табличка счетчика

Воздействие магнитного поля на вихревые токи пропорционально произведению мгновенных значений тока и напряжения, т. е. пропорционально мощности, следовательно, на диск действует вращающий момент, пропорциональный мощности:

$$M_{вр} = K_{вр} P,$$

где  $K_{вр}$  — постоянный коэффициент.

Диск счетчика при своем вращении проходит между полюсами постоянного тормозного магнита 5 и пересекает его магнитные линии. В результате этого постоянный магнит также индуцирует в диске вихревые токи. Взаимодействие магнитного поля постоянного магнита и вихревых токов создает необходимое торможение диска, пропорциональное скорости его вращения.



## § 72. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА. РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЕРМЕТРА

Для измерения силы тока в электрических цепях служат амперметры, миллиамперметры и микроамперметры различных систем. Их включают в цепь последовательно, и через прибор проходит весь ток, протекающий в цепи.

При различных электрических измерениях весьма важно, чтобы измерительный прибор как можно меньше изменял электрический режим цепи, в которую его включают. По этой причине амперметр должен обладать незначительным сопротивлением по сравнению с сопротивлением цепи. Пусть в электрическую цепь включен источник электрической энергии, напряжение которого  $U=10$  в. Сопротивление потребителя  $r_2=20$  ом. В этой цепи, согласно закону Ома, ток

$$I = \frac{U}{r_2} = \frac{10}{20} = 0,5 \text{ а.}$$

Допустим, что обмотка миллиамперметра, которым следует измерить ток, имеет сопротивление  $r_a=30$  ом. Тогда при включении прибора в цепь в ней установится ток

$$I = \frac{U}{r_a + r_2} = \frac{10}{20 + 30} = \frac{10}{50} = 0,2 \text{ а.}$$

Таким образом, если включить в цепь прибор с большим сопротивлением, то нарушится ее электрический режим и сила тока будет измерена с ошибкой на 0,3 а.

Этот пример подтверждает, что желательно измерять силу тока в цепи таким прибором, у которого собственное сопротивление наименьшее. Присоединить амперметр к полюсам источника тока без нагрузки нельзя. Это объясняется тем, что по обмотке амперметра, имеющей малое сопротивление, в данном случае пройдет большой ток и она может перегореть. По той же причине нельзя включать амперметр параллельно нагрузке. По обмотке и отдельным элементам электронизмерительных приборов некоторых систем во избежание возможности их порчи нельзя пропустить сколько-нибудь значительный ток. В частности, это относится к спиральным пружинам и подвижной катушке магнитоэлектрического прибора.

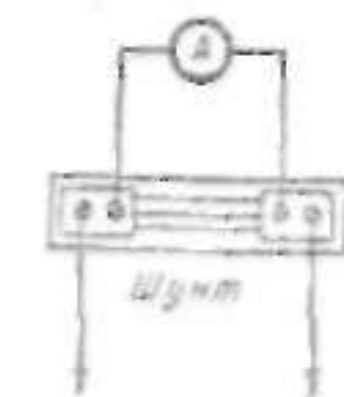


Рис. 84. Схема соединения амперметра с шунтом

Если такой измерительный прибор нужно приспособить для измерения значительной силы тока — расширить пределы измерения амперметра, то он снабжается шунтом.

Шунт — это относительно малое, но точно известное сопротивление ( $r_{ш}$ ), присоединяемое параллельно измерительному механизму. Схема включения амперметра с шунтом показана на рис. 84. При таком включении шунта из  $n$  частей тока, протекающего в цепи, через прибор проходит лишь одна его часть, а через шунт — осталь-

ные  $n-1$  частей. Это происходит потому, что сопротивление шунта меньше сопротивления амперметра в  $n-1$  раз. Число  $n$  показывает, во сколько раз нужно увеличить предел измерения амперметра. Таким образом, шунт служит для расширения пределов измерения прибора.

Пусть амперметр позволяет измерять силу тока  $I_a=5$  а, а в данном случае необходимо этим прибором измерить силу тока  $I=30$  а. Значит, нужно увеличить предел измерения прибора в  $n = \frac{I}{I_a} = \frac{30}{5} = 6$  раз. Сопротивление шунта, который надо присоединить параллельно амперметру, чтобы обеспечить такое расширение предела измерения, можно определить по формуле:

$$r_{ш} = \frac{r_a}{n-1}. \quad (95)$$

Если сопротивление амперметра  $r_a=0,15$  ом, то сопротивление шунта

$$r_{ш} = \frac{0,15}{6-1} = 0,03 \text{ ом.}$$

После присоединения шунта к прибору каждое деление шкалы прибора будет соответствовать величине, в  $n$  раз большей, чем указана на ней. В нашем случае, если стрелка прибора с шунтом установится на делении 6, это значит, что в цепи протекает ток  $I=5 \cdot n = 5 \cdot 6 = 30$  а.

Шунт должен иметь четыре зажима, это необходимо для устранения влияния на сопротивление шунта переходных сопротивлений контактов. Шунты изготовляют из манганина — сплава, у которого температурный коэффициент сопротивления практически равен нулю.

## § 73. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ. РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТМЕТРА

Для измерения напряжения служат вольтметры, милливольтметры и микровольтметры различных систем. Эти приборы включают параллельно нагрузке, а потому сопротивление их должно быть как можно больше. В связи с этим уменьшается достоверность произведенного измерения.

Для расширения пределов измерения вольтметра к обмотке измерительного механизма последовательно присоединяют многоо姆ное сопротивление, достигающее названия *добавочного сопротивления* ( $r_2$ ). Схема включения вольтметра с добавочным сопротивлением приведена на рис. 85.

При такой схеме из  $n$  частей напряжения, подлежащего измерению, на обмотку прибора приходится лишь одна часть, а остальные



Рис. 85. Схема соединения вольтметра с добавочным сопротивлением



$n - 1$  частей — из добавочное сопротивление. Это происходит потому, что сопротивление  $r_d$  берется больше сопротивления вольтметра в  $n - 1$  раз, а при последовательном соединении напряжение распределяется пропорционально величине сопротивления.

Добавочное сопротивление

$$r_d = r_v (n - 1). \quad (96)$$

Общее измеренное напряжение равно сумме падения напряжения на этих сопротивлениях.

Число  $n$  показывает, во сколько раз расширяют предел измерения вольтметра.

Пусть имеющийся у нас вольтметр позволяет измерять напряжение  $U_2 = 30$  в, а необходимо измерить этим прибором напряжение  $U = 120$  в. Значит, нужно расширить предел его измерения в

$$n = \frac{U}{U_2} = \frac{120}{30} = 4 \text{ раза.}$$

Добавочное сопротивление, которое надо присоединить последовательно к вольтметру, можно определить по формуле

$$r_d = r_v (n - 1).$$

Если сопротивление вольтметра  $r_v = 3000$  ом, то для расширения предела измерения прибора в 4 раза необходимо, чтобы добавочное сопротивление

$$r_d = r_v (n - 1) = 3000 (4 - 1) = 9000 \text{ ом.}$$

После присоединения к вольтметру добавочного сопротивления каждое деление шкалы прибора будет соответствовать величине, в  $n$  раз большей, чем указано на ней. Например, в нашем случае, если стрелка прибора установится на цифре 30, то это будет означать, что напряжение

$$U = 30 \cdot n = 30 \cdot 4 = 120 \text{ в.}$$

Добавочные сопротивления изготовляют чаще всего из манганина или константана. Оба эти материала имеют большое удельное сопротивление и малый температурный коэффициент сопротивления.

Шунты и добавочные сопротивления могут быть установлены внутри корпуса прибора или подключаться к его зажимам на время измерений.

#### § 74. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Для измерения сопротивлений служит омметр. Возможность измерения сопротивления основана на том, что при постоянном напряжении сила тока в электрической цепи зависит от сопротивления. Эта зависимость позволяет по величине тока в цепи судить о ее сопротивлении. Стрелка омметра показывает на шкале величину сопротивления присоединенного к зажимам прибора.

Схема магнитоэлектрического омметра показана на рис. 86. Пользуясь этой схемой, объясним, как по отклонению рамки прибора можно судить о величине измеряемого сопротивления.

Пусть внутреннее сопротивление прибора, состоящее из сопротивления обмотки и добавочного  $r_d$ , равно 2250 ом. Отклонение

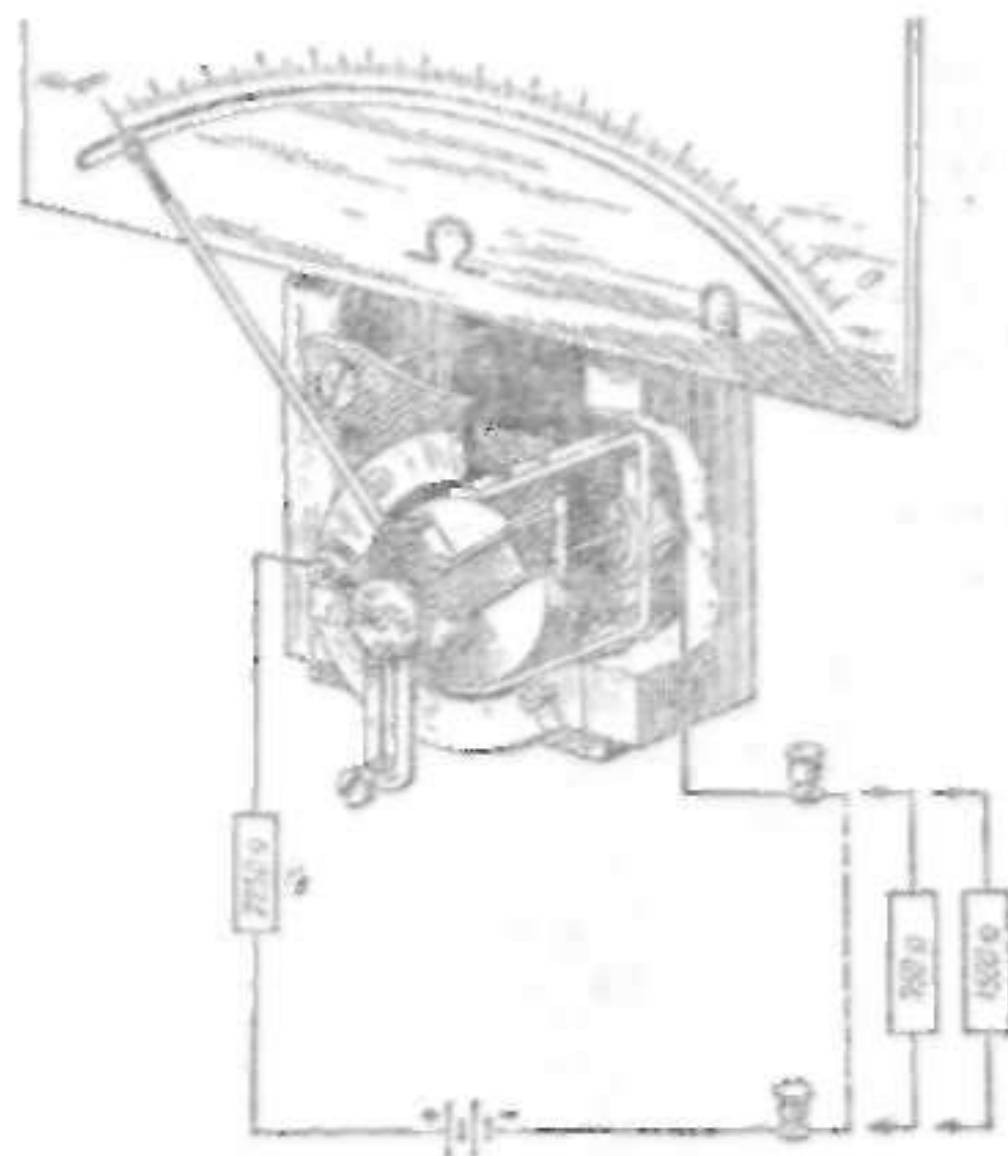


Рис. 86. Упрощенная схема магнитоэлектрического омметра

стрелки прибора на всю шкалу происходит при подключении напряжения 4,5 в. Включим в цепь прибора батарею с таким напряжением  $U$  и замкнем зажимы (на рисунке показано пунктиром).

Ток в обмотке рамки определим по закону Ома:

$$I = \frac{U}{r} = \frac{4,5}{2250} = 0,002 \text{ а.}$$

Ток, равный 0,002 а, отклоняет рамку со стрелкой до конца шкалы. Так как это отклонение происходит при внешнем сопротивлении, равном нулю, то против точки отклонения стрелки на шкале ставим нуль.

Не изменяя напряжения источника тока, присоединим к зажимам сопротивление  $r = 750$  ом и снимем перемычку, показанную на рисунке пунктиром. Тогда полное сопротивление цепи будет:

Увеличение общего сопротивления на 750 ом вызовет уменьшение тока, отклоняющего рамку, и поэтому угол ее отклонения станет меньше. Новое, меньшее отклонение стрелки пометим на шкале цифрой 750 ом, соответственно величине присоединенного внешнего сопротивления.

Теперь присоединим к зажимам прибора другое внешнее сопротивление, например 1500 ом. Стрелка отклонится еще меньше. Обозначим это отклонение на шкале цифрой 1500 ом.

Проводя опыт дальше, будем увеличивать сопротивление и отмечать соответствующими цифрами отклонения стрелки, пока она не останется в самом начале шкалы. Это произойдет тогда, когда внешнее сопротивление будет так велико, что практически ток в цепи станет равным нулю. Над делением, соответствующим отсутствию тока в цепи, поставим знак бесконечно большого сопротивления.

Разметка шкалы измерительного прибора называется *градировкой*. В данном случае мы проградуировали шкалу прибора в омах и можем им пользоваться как омметром.

Еще раз напомним, что показания стрелки будут соответствовать действительным величинам внешнего сопротивления только в том случае, если источник тока имеет неизменное напряжение.

### § 75. МЕГОМЕТР

По правилам эксплуатации электрических установок низкого напряжения сопротивление изоляции участка цепи должно быть не ниже 1000 ом на каждый вольт рабочего напряжения. Например, при напряжении 127 в сопротивление изоляции провода должно быть  $127 \cdot 1000 = 127\ 000\ \text{ом} = 127\ \text{ком}$ .

Для измерения сопротивления изоляции электрических цепей, обмоток электрических машин и электроустановок служат мегомметры (приборы, измеряющие миллионы ом) — переносные приборы магнитоэлектрической системы.

Мегомметр (рис. 87) состоит из двух основных частей: измерительного устройства и генератора постоянного тока с ручным приводом.

Измерительное устройство прибора представляет собой магнитоэлектрический гальванометр, на подвижной оси которого имеется не одна рамка с обмоткой, как у обычного прибора этой системы, а две рамки, расположенные под некоторым углом одна относительно другой.

По обмотке одной рамки мегомметра протекает ток, пропорциональный силе тока в измеряемой цепи, а по обмотке второй рамки — ток, пропорциональный напряжению. Таким образом, угол поворота стрелки мегомметра зависит от токов, протекающих по двум обмоткам прибора. Согласно закону Ома сила тока в каждой обмотке зависит от сопротивления цепи. Поэтому отклонение

стрелки мегомметра пропорционально измеряемому сопротивлению, к которому подключается прибор.

Из сказанного следует, что мегомметр сочетает в себе амперметр и вольтметр и выполняет «сам» вычисление сопротивления по формуле  $r = \frac{U}{I}$ , стрелка прибора показывает на шкале величину измеряемого сопротивления.

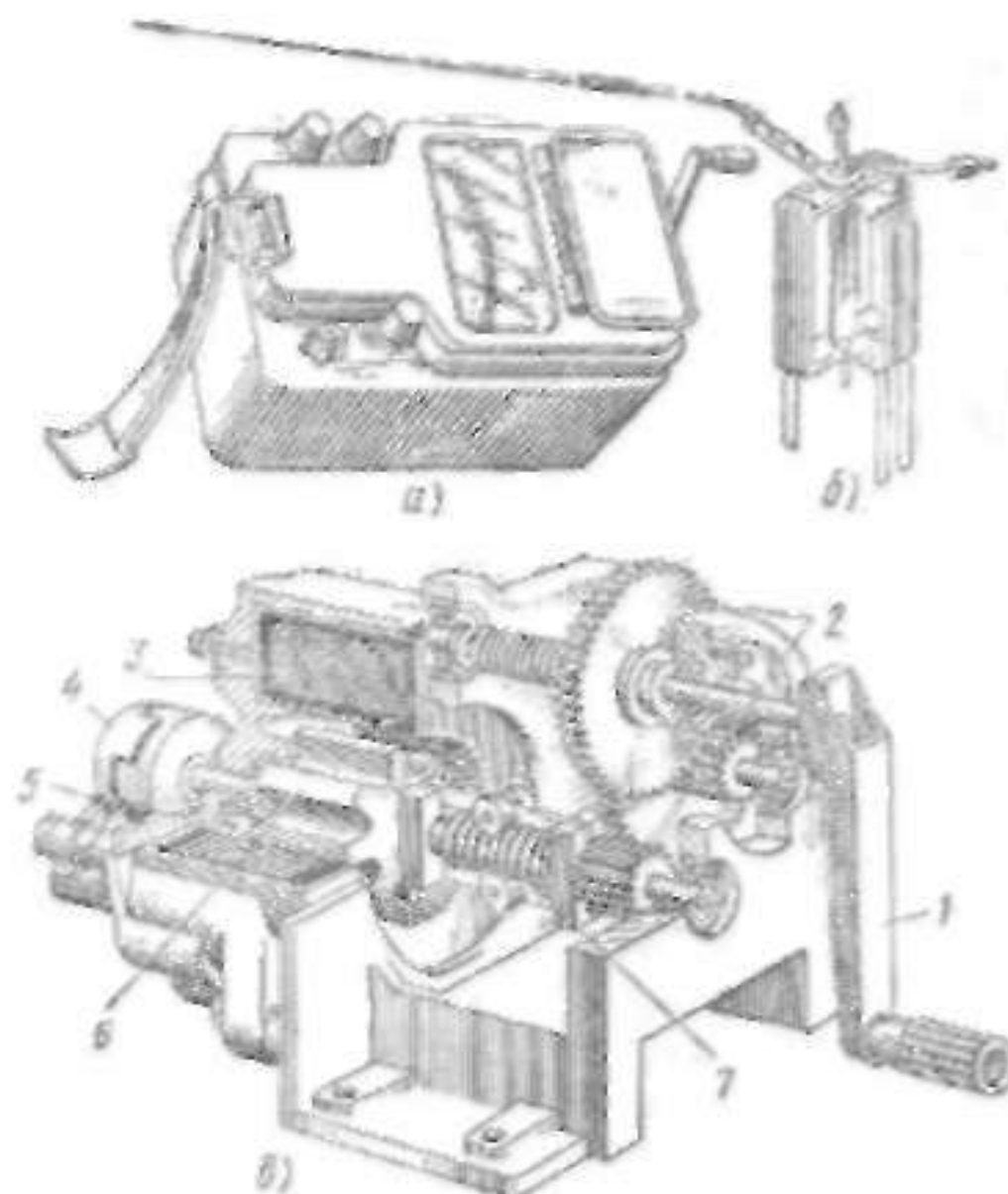


Рис. 87. Мегомметр:

1 — ручный вид, 2 — обмотка мегомметра, 3 — генератор

При вращении рукоятки 1 (см. рис. 87, б) приходит во вращение зубчатая передача 2, многополюсный магнит ротора 6 и регулятор скорости генератора 7. При вращении магнита ротора его магнитный поток пересекает витки обмотки 3 статора и в ней наводится э. д. с., которая через коллектор 4 и щетки 5 поступает в схему прибора.

Для проверки мегомметра перед измерением его устанавливают в горизонтальное положение, а зажимы («Линия» и «Земля») прибора соединяют между собой. Вращая рукоятку генератора со скоростью 120 об/мин, проверяют, совпадает ли стрелка мегомметра



с нулевым делением шкалы. Затем при разомкнутых зажимах вращают рукоятку генератора с той же скоростью. При этом стрелка прибора должна установиться на отметку со знаком ∞.

Чтобы измерить сопротивление изоляции между двумя проводами, следует отключить их от сети и присоединить один провод к зажиму «Линия», а другой — к зажиму «Земля». Вращая рукоятку генератора мегомметра, можно определить сопротивление изоляции по положению стрелки на шкале прибора.

При измерении сопротивления изоляции между обмотками двигателя поступают так: снимают переключки с панели зажимов двигателя и соединяют конец первой обмотки с зажимом «Линия», а конец второй обмотки — с зажимом «Земля» мегомметра.

Вращая рукоятку прибора, определяют по шкале сопротивление изоляции между обмотками. Если необходимо измерить сопротивление изоляции обмотки двигателя по отношению к земле, то соответственно присоединяют обмотку к зажиму «Линия» мегомметра, а корпус — к зажиму «Земля».

#### § 76. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР

Широкое распространение получили переносные универсальные электронизмерительные многопредельные приборы — ампервольт-омметры, которые могут измерять силу тока, напряжение, сопротивление.



Рис. 88. Универсальный электронизмерительный прибор

На рис. 88 изображен внешний вид миллиампервольт-омметра, позволяющего измерять величину постоянного тока, постоянное и переменное напряжение и сопротивление. Так как прибор измеряет амперы, вольты и омы, его иногда сокращенно называют авометром.

Циферблат прибора имеет три шкалы. Верхняя шкала обозначена «∞» и предназначена для измерения сопротивления. Средняя шкала со знаком «~» служит для отсчета величин переменного напряжения. Нижняя шкала, около которой стоит знак «=», дает возможность определить величину постоянного тока и напряжения.

Схема прибора составлена так, что позволяет при измерении тока включать в цепь различные шунты, при измерении напряжения — добавочные сопротивления, а при измерении переменного напряжения — полупроводниковый выпрямитель.

Прибор снабжен двумя гибкими разноцветными проводами с

законечниками — штеккерами. Одни концы проводов при помощи штеккеров вставляются в гнезда, расположенные на лицевой панели прибора, а другие включаются в цепь, в которой измеряется ток, напряжение или сопротивление.

#### § 77. МОСТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Для измерения сопротивления и других электрических величин широко используются измерительные мосты (рис. 89).

Переменные сопротивления  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_4$  образуют плечи моста. Плечо моста  $r_2$  является неизвестным измеряемым сопротивлением ( $r_x = r_2$ ). Плечи моста образуют две параллельные ветви. В ветвь  $ABD$  включены сопротивления  $r_1$  и  $r_3$ , которые соединены последовательно. Ветвь  $ACD$  состоит из сопротивлений  $r_2$  и  $r_4$ , также соединенных последовательно. В диагональ моста  $BC$  (мостовая ветвь) включен гальванометр магнитоэлектрической системы, а в диагональ  $AD$  — источник постоянного тока напряжением  $U$ .

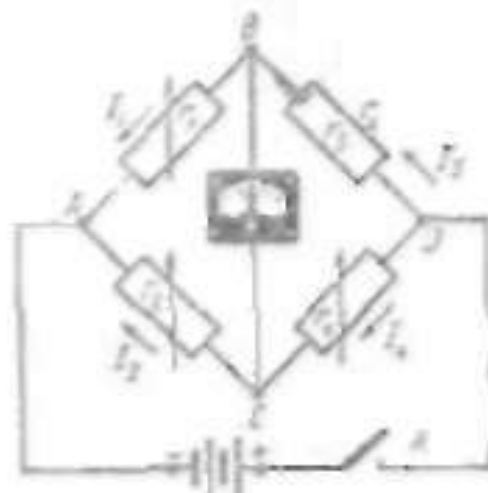


Рис. 89. Принципиальная схема моста для измерения сопротивления

Подбором величин сопротивлений  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_4$  можно добиться того, что в цепи гальванометра (в мостовой ветви) на участке  $BC$  тока не будет. В этом случае говорят, что мост уравновешен. Когда в гальванометре ток равен нулю, потенциал точек  $B$  и  $C$  равен между собой. Если в точках  $B$  и  $C$  потенциал различный, то через гальванометр потечет ток и мост уравновешен не будет.

Потенциалы в точках  $B$  и  $C$  будут равны в том случае, когда на участках  $AB$  и  $CA$  будет одинаковое падение напряжения.

Это равенство можно записать так:

$$I_1 r_1 = I_3 r_3$$

но при этом условия должны быть равны между собой и напряжения на участках  $BD$  и  $CD$ . Запишем это равенство:

$$I_2 r_2 = I_4 r_4$$

Разделим первое равенство на второе и получим пропорцию

$$\frac{I_1 r_1}{I_2 r_2} = \frac{I_3 r_3}{I_4 r_4}$$

Сопротивления  $r_1$  и  $r_3$  соединены последовательно и поэтому токи  $I_1$  и  $I_3$  равны между собой. Сопротивления  $r_2$  и  $r_4$  также соединены последовательно и, следовательно, токи  $I_2$  и  $I_4$  также равны.

Произведя сокращение в пропорции равных токов, получим:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}$$



отсюда определим неизвестное сопротивление  $r_x = r_3$ :

$$r_x = \frac{r_1}{r_2} r_4 \quad (97)$$

В связи с тем что величины сопротивлений  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_4$  моста известны, подставим их значения в формулу (97) и определим величину неизвестного сопротивления  $r_x$ .

Для измерения сопротивления таким мостом необходимо: подключить к зажимам  $r_x$  моста неизвестное сопротивление, а к зажимам «+» и «-» подключить источник постоянного тока; установить соотношение плеч моста  $r_1$  и  $r_2$ , включить гальванометр и подобрать сопротивление плеча моста  $r_4$  так, чтобы стрелка гальванометра стояла на нулевом делении (это укажет на то, что мост уравновешен); подставить в формулу (97) известные величины  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_4$  и вычислить величину измеряемого сопротивления.

### § 78. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ

Мощность постоянного тока, потребляемая данным участком электрической цепи, равна произведению напряжения на силу тока:

$$P = IU \quad (98)$$

Для определения мощности необходимо включить в цепь вольтметр и амперметр и показания приборов перемножить.

Мощность постоянного и переменного тока можно также измерить ваттметром электродинамической системы (рис. 90).

Неподвижная обмотка ваттметра, имеющая малое сопротивление, включается в цепь последовательно (как амперметр), а подвижная обмотка, имеющая большое сопротивление, — параллельна нагрузке (как вольтметр).

Показания электродинамического ваттметра при измерении мощности переменного тока пропорциональны произведению напряжения на силу тока и коэффициент мощности:

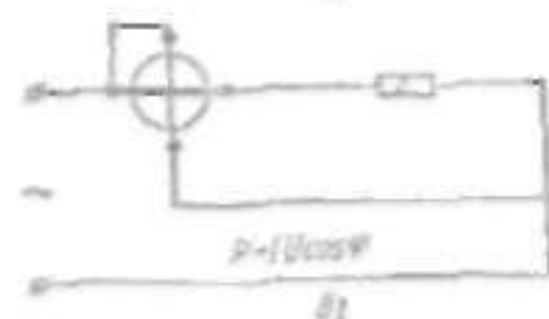
$$P = IU \cos \varphi \quad (99)$$

Для измерения расхода электрической энергии переменного тока применяют индукционные счетчики.

Счетчик включают в цепь по схеме (см. рис. 83, б). Как и при



а)



б)

Рис. 90. Ваттметр:

а — общий вид, б — схема включения

включении ваттметра одна обмотка счетчика включается в цепь последовательно, а вторая — параллельно нагрузке.

Провода сети присоединяются к зажимам 1 и 3, а провода, идущие через плавкие предохранители к нагрузке, подключают к зажимам 2 и 4.

На таблице счетчика указано, на какое напряжение, силу тока и частоту он рассчитан, в каких единицах измеряет энергию, какому количеству оборотов диска соответствует расход энергии в 1 *квт-ч*.

Для подсчета энергии за некоторый промежуток времени необходимо знать начальное и конечное показания счетчика. Разность этих показаний определяет количество использованной электроэнергии.

Если, например, начальное показание счетчика было 603 *квт-ч*, а конечное — 790 *квт-ч*, то расход составляет:

$$790 - 603 = 187 \text{ квт-ч.}$$

Стоимость 1 *квт-ч* энергии 4 коп., стоимость всей израсходованной энергии

$$187 \cdot 4 = 748 \text{ коп., или 7 р. 48 к.}$$

### § 79. ПОНЯТИЕ ОБ ИЗМЕРЕНИИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Электронизмерительная техника по сравнению с другими видами измерительных устройств обладает большей надежностью, точностью, дешевизной и простотой.

По этим причинам электронизмерительные приборы широко применяют для измерения неэлектрических величин.

Основными частями электрической системы, служащей для измерения неэлектрических величин, являются преобразователь (датчик), промежуточные устройства и индикатор. Сущность электрических измерений неэлектрических величин заключается в том, что датчик преобразует неэлектрическую величину, например изменение уровня жидкости, температуры, скорости движения и т. п., в изменение электрической величины сопротивления, тока или напряжения, которое измеряется индикатором, представляющим собой обычный электронизмерительный прибор.

Рассмотрим устройство некоторых электрических датчиков и примеры их применения для электрических измерений неэлектрических величин.

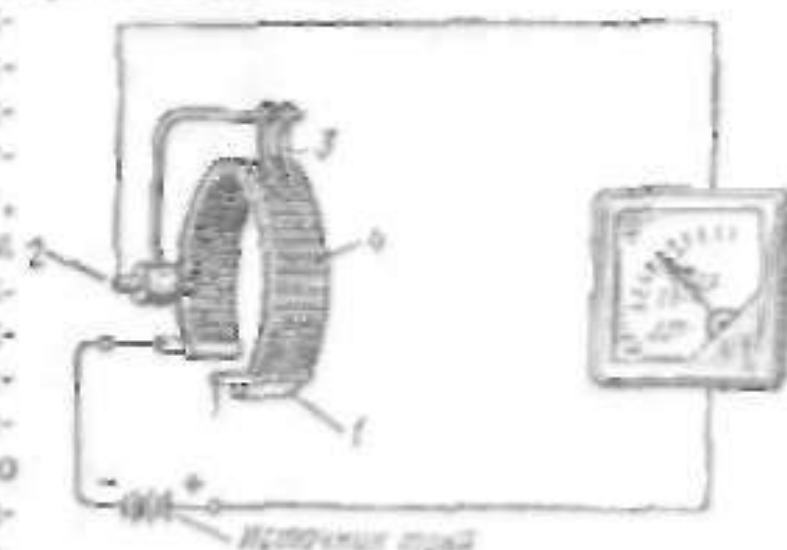


Рис. 91. Принцип действия резисторного датчика



*Резисторный датчик* (рис. 91) представляет собой изогнутую (или прямую) пластину 1 из изоляционного материала, на которую намотана проволока 4 из материала с большим удельным сопротивлением. При повороте оси 2 подвижный контакт-щетка 3 датчика перемещается по проволоке, в результате чего изменяется ее сопротивление, что соответственно воздействует на показания электроизмерительного прибора.

Резисторный датчик используют для измерения уровня жидкости в баке.

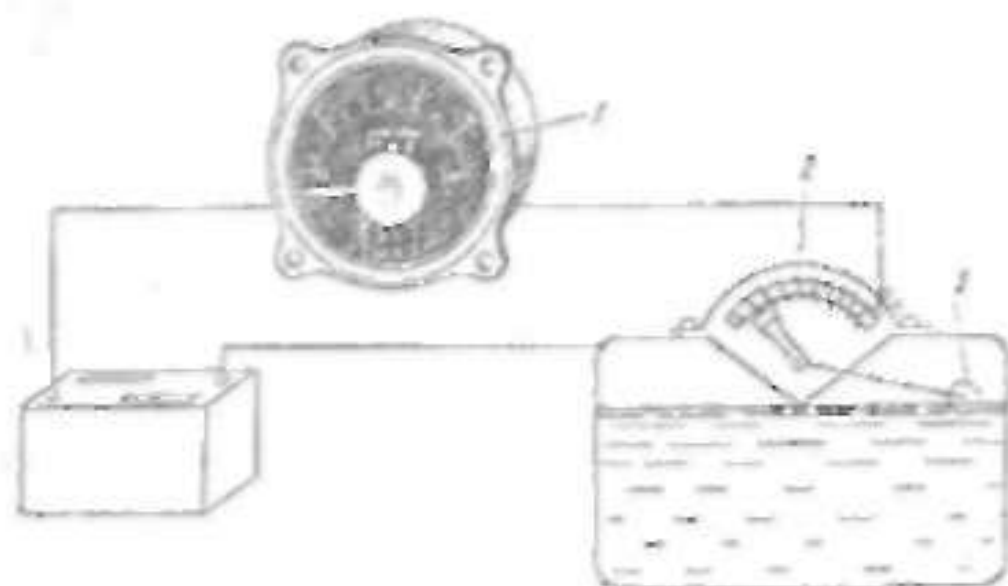


Рис. 92. Схема прибора для измерения уровня жидкости

Действие прибора, предназначенного для определения количества жидкости в баке (рис. 92), основано на использовании резисторного датчика, сопротивление которого меняется при повышении или понижении уровня жидкости.

Этот прибор состоит из датчика 2 и индикатора 1. Ползунок датчика через систему рычагов скреплен с поплавком 3, находящимся на поверхности жидкости в баке. Индикатором служит прибор магнитоэлектрической системы, шкала которого проградуирована в литрах.

Когда в баке много жидкости, поплавок перемещается вверх. Вместе с ним передвигается щетка датчика, сопротивление которого уменьшается. Ток в цепи возрастает, и стрелка индикатора отклоняется на большой угол, указывая по шкале количество жидкости. При опускании поплавка сопротивление датчика увеличивается, ток в цепи становится меньше и стрелка прибора отклоняется влево, указывая, что в баке мало жидкости.

*Электроконтактные датчики* служат для преобразования механического перемещения измерительного штока, соприкасающегося с поверхностью контролируемого объекта, в замыкание или размыкание электрической цепи. Наиболее простым электроконтактным датчиком является однопредельный, который имеет одну пару контактов. Многопредельные датчики с несколькими парами контактов могут одновременно контролировать несколько различных объектов.

На рис. 93 приведена схема устройства и действия электроконтактного датчика, используемого для измерения размеров деталей. Измерительный шток 1 под действием пружины 2 стремится выдвинуться из корпуса датчика вниз.

Если геометрический размер контролируемой детали 3 больше заданного, измерительный шток поднимается, размыкает контакт 4 и замыкает контакт 5. При нахождении под штоком изделия с размером меньше заданной величины контакт 5 размыкается и замыкается контакт 4. При нормальном размере контролируемой детали контакты 4 и 5 остаются разомкнутыми.

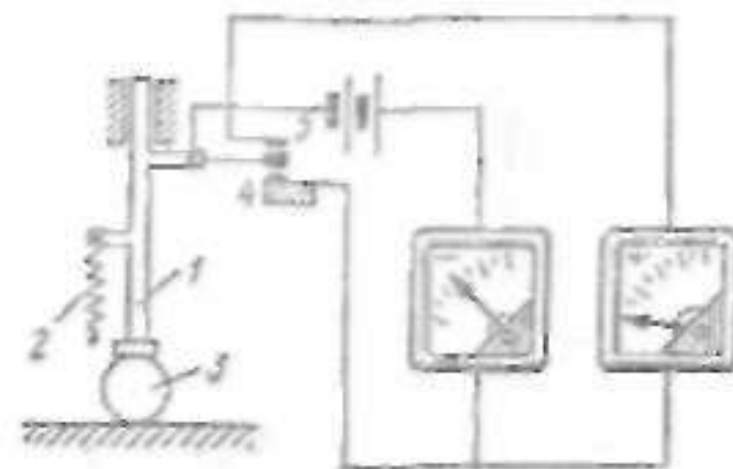


Рис. 93. Устройство электроконтактного датчика

К датчику можно присоединить электроизмерительные приборы. Отклонение стрелки одного прибора соответствует большему размеру детали, а другого — меньшему размеру. Положение стрелок у нулевого деления означает, что под шупом датчика проходят детали заданных размеров.

Вместо электроизмерительных приборов можно подключить к датчику электромагнитные счетчики, при помощи которых учитывается количество деталей брака — большего и меньшего размеров.

Счетчики можно заменить разноцветными сигнальными лампами.

*Индукционные датчики* преобразуют незлектрические величины в индуктированную э. д. с., которая измеряется электроизмерительным прибором.

В индукционном датчике (рис. 94) катушка 1, помещенная на сердечнике 2, перемещается в зазоре постоянного магнита 3 (или электромагнита) и в ней индуктируется э. д. с.

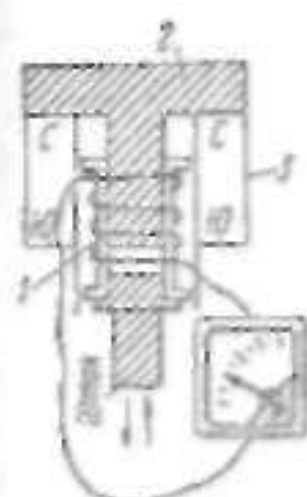


Рис. 94. Устройство индукционного датчика

Для автоматического контроля размеров детали в процессе ее обработки на станке применяют виброконтактный прибор с индукционным датчиком. Он позволяет значительно увеличить производительность станков, облегчает труд рабочих, резко сокращает брак.

Схема устройства виброконтактного прибора приведена на рис. 95. Деталь обрабатывается шлифовальным кругом 7. Размеры обрабатываемой детали контролируются датчиком-шупом 6, выполненным в виде рычага. Шуп прижимается к детали 8 под действием плоской пружины 5. Когда по электромагниту 4 пропускают переменный ток, выступ шупа то притягивается к сердечнику



этого электромагнита, то отходит от него. При этом шуп получает колебательные движения по вертикали (100 раз в секунду).

Верхний конец шупа соединен с намагниченным от постоянного магнита 2 сердечником 3 второго электромагнита, обмотка которого соединена с электроизмерительным прибором — индикатором 1. Шкала индикатора отградуирована в миллиметрах.

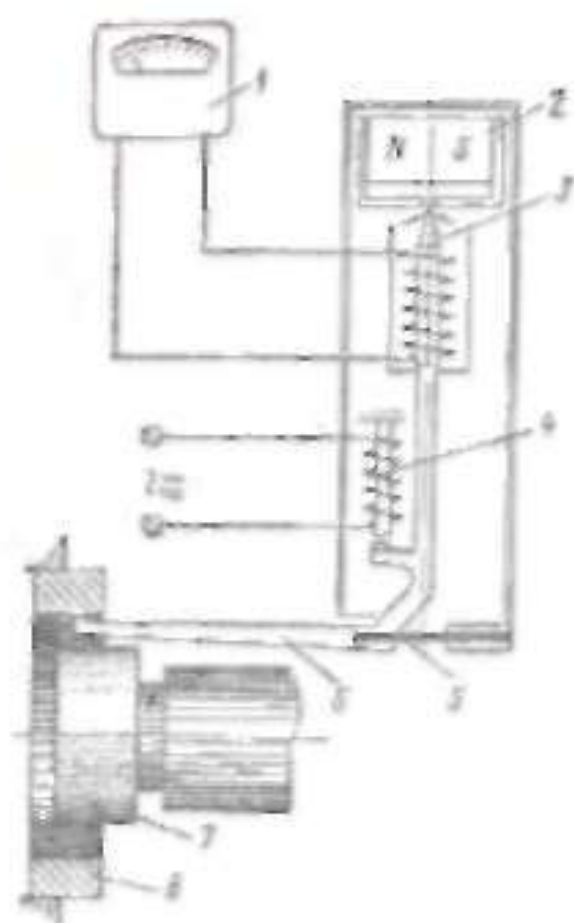


Рис. 96. Устройство бесконтактного прибора для автоматического контроля размеров детали

При колебаниях шупа магнитное поле сердечника 3 пересекает витки электромагнита и в ней индуцируется э. д. с., под действием которой по обмотке измерительного прибора начинает проходить ток.

Когда шуп подвигают к обрабатываемой детали, его рабочая часть ударяет о ее поверхность. По мере обработки детали размах колебаний шупа изменяется, а вместе с этим меняются индуцируемая в электромагните э. д. с. и сила тока в индикаторе. По положению стрелки на шкале индикатора рабочий следит за размером обрабатываемой детали.

Такой прибор может работать автоматически и в момент достижения заданного размера через специальное устройство остановить станок.

Для измерения скорости вращения вала применяют электрические тахометры. Они состоят из индукционного датчика и индикатора. Датчик представляет собой маленький генератор электрической энергии. Напряжение, даваемое этим генера-

тором, изменяется пропорционально скорости вращения его оси. К зажимам датчика присоединяется индикатор-вольтметр, шкала которого отградуирована в единицах скорости.

Чтобы определить скорость вращения вала машины, ось датчика соединяют с валом при помощи зубчатой или иной передачи. В обмотке датчика индуцируется э. д. с., пропорциональная скорости вращения вала. Ее величину показывает стрелка на шкале прибора.

Для измерения температуры используется зависимость величины э. д. с. термопары от температуры нагрева места ее спая.

На рис. 96 показан термоэлектрический измеритель температуры. Он состоит из датчика 1 в виде термопары и индикатора 2 — электроизмерительного прибора, шкала которого отградуирована в градусах температуры. Этим электротермометром можно измерять температуру, например, в пределах от 0 до 100° С.

На рис. 97 показана схема использования пьезоэлектрического датчика для измерения давления.

Через трубку 1 пьезоэлектрического манометра пар, давление которого необходимо измерить, воздействует на мембрану 2 и через шайбу 3 передается на две пластинки 4 пьезоэлектрика из кварца. При сжатии кварца на его концах, соединенных с электродом 6, появляется отрицательный электрический заряд, а на противоположных концах кварцевых пластинок, соединенных с корпусом 5, — положительный заряд.

Электрод 6 и корпус 5 манометра проводниками соединя-

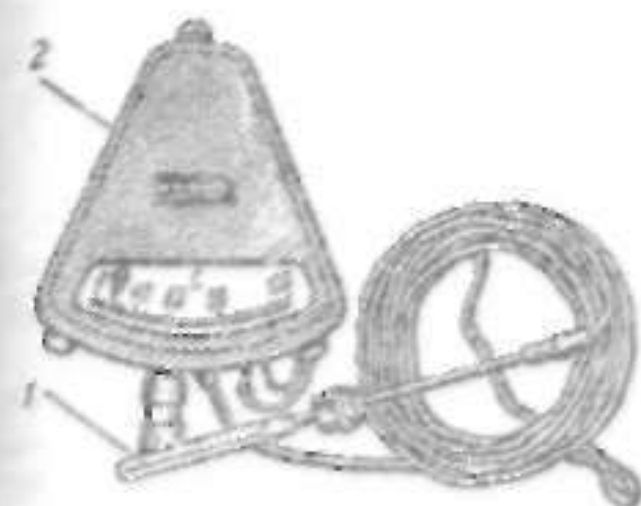


Рис. 96. Термоэлектрический измеритель температуры

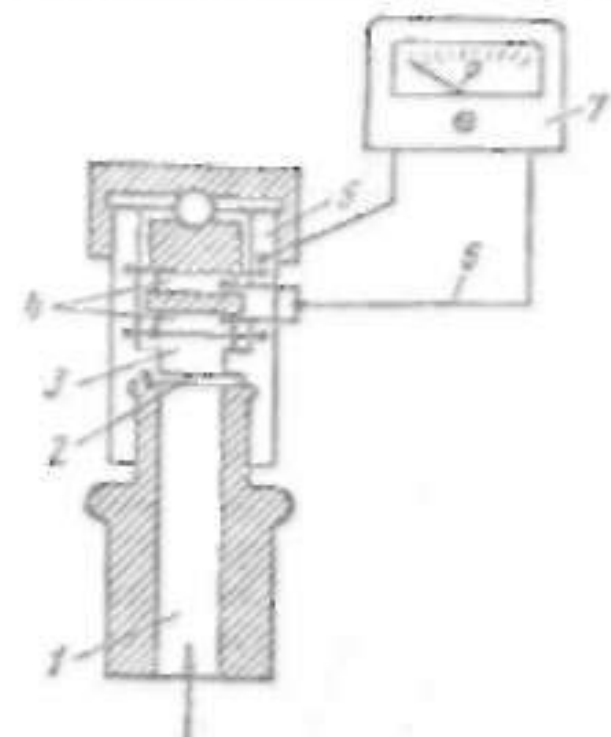


Рис. 97. Пьезоэлектрический манометр

ются с индикатором — электроизмерительным прибором 7, шкала которого отградуирована в единицах измерения давления.

Этот прибор измеряет величину зарядов, возникающих на кварцевых пластинках, а следовательно, и давление.

Пьезоэлектрические манометры пригодны для измерения больших и очень малых давлений. Это связано с тем, что ничтожно малое количество электричества, появляющееся на концах пьезоэлектриков при весьма малых давлениях, можно подать на усилитель, а затем измерить электроизмерительным прибором.

### Контрольные вопросы

1. Какими приборами измеряется сила тока, напряжение и сопротивление?
2. Назовите преимущества приборов электромагнитной системы.
3. На каком принципе основано действие приборов магнитоэлектрической системы?
4. Для чего к амперметру подключают шунт?
5. По какой формуле можно вычислить истинную добротность сопротивления, присоединяемого к вольтметру?
6. Какими приборами измеряют расход электрической энергии?
7. Для чего служат датчики?
8. Изобразите схему включения ваттметра.
9. По какой формуле вычисляется неизвестное сопротивление, измеренное током, при его электрическом разрыве?