Библиотека электромонтера

Б. А. Пономарев

Электрические измерения

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

с 1093333

6П2.10
П563

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 73

Б. А. ПОНОМАРЕВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1962 ЛЕНИНГРАД

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Большам Я. М., Васильев А. А., Долгов А. Н., Ежков В. В., Каминский Е. А., Смирнов А. Д., Устинов П. И.

ЭЭ-3-3

Даны сведения об электроизмерительных приборах, применяемых при измерениях тока, напряжения, мощности, электроэнергии, частоты и коэффициента мощности. Описан принцип работы трансформаторов тока и напряжения. Приведены схемы включения электроизмерительных приборов и объяснена техника выполнения измерений.

Брошюра рассчитана на электромонтеров электрических станций и сетей, промышленных, сельскохозяйственных, транспортных и коммунально-бытовых электроустановок, имеющих образование 8—10 классов и знакомых с основами электротехники.

6П2.1.08 Пономарев Борис Александрович
П 56 Электрические измерения, М. — Л., Госэнергоиздат, 1962, 56 с. с черт. (Б-ка электромонтера, вып. 73).
6П2.1.08

Редактор *Е. А. Каминский* Техн. редактор *В. В. Емжин*

Сдано в набор 1/III 1962 г. Подписано к печати 31/V 1962 г.
Т-04800 Бумага 84×108¹/₃₂ 2,87 печ. л. Уч.-изд. л. 3,0
Тираж 25 000 экз. Цена 11 коп. Заказ 2143

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

Государственная публичная библиотека им. В. Г. Белинского г. Свердловск

1093333

1. НАЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Электрические измерения имеют весьма важное значение в науке и технике, так как без измерений невозможно изучать электрические явления, контролировать работу электроустановок и правильно вести производственные процессы.

Программа Коммунистической партии Советского Союза, принятая на XXII съезде КПСС, программа построения коммунистического общества ставит перед советскими энергетиками грандиозные задачи.

Мощное энергостроительство и развитие электропромышленности, все возрастающие производство и потребление электроэнергии, а также массовая электрификация промышленности, транспорта, сельского хозяйства, быта городского и сельского населения требуют высокоразвитой измерительной техники.

Для обеспечения надежной, качественной и экономичной работы электрических станций и электрических сетей, а также электроустановок потребителей необходимы измерения тока, напряжения, мощности, энергии, коэффициента мощности и частоты.

При снижении качества энергии у потребителей возникают нарушения технологического процесса. Снижение частоты в энергетической системе вызывает уменьшение скорости вращения механизмов, приводимых электродвигателями, вследствие чего снижается производительность агрегатов и возможен брак продукции. Понижение напряжения влечет за собой нагрев электрических двигателей, снижение их вращающего момента, уменьшение светоотдачи ламп накаливания и т. д.

При повышении напряжения резко сокращается срок службы обмоток аппаратов (трансформаторов, реле и т. п.) и осветительных приборов, возрастает потребление реактивной мощности, а в электрических машинах постоянного тока возникает круговой огонь на коллекто-

ре. Токовые перегрузки элементов электроустановок ведут к повышенным потерям электроэнергии и мощности в сетях, а следовательно, и к снижению напряжения. Перегрузка значительно снижает срок службы изоляции проводов. Снижение $\cos\varphi$ электрических двигателей приводит к увеличению потребляемого тока и, следовательно, к увеличению потерь в сетях.

Практическое значение электрических измерений с ростом энергетики в СССР все более возрастает. По плану текущего семилетия электротехническая промышленность в 1965 г. изготовит электроизмерительных приборов в 2,5—2,6 раза больше, чем в 1958 г.

Электрические измерения способствуют повышению производительности труда, снижению расхода топлива, воды, материалов, снижению потерь энергии во всех процессах, что при огромном размахе электрификации может дать очень большие сбережения.

2. ПРИБОРЫ, ПРИМЕНЯЮЩИЕСЯ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Электроизмерительные приборы могут быть подразделены на группы в зависимости от того, что они измеряют (ток, напряжение и т. п.); в каких условиях производятся измерения (на щитах, при испытаниях, в условиях тряски); какие физические процессы положены в основу устройства прибора; какая точность может быть достигнута при измерениях.

Для измерения тока служат амперметры, килоамперметры (1 *ка* = 1 000 *а*), миллиамперметры (1 *ма* = 0,001 *а*), микроамперметры (1 *мка* = 0,000001 *а*). Для измерения напряжения пользуются вольтметрами, киловольтметрами (1 *кв* = 1 000 *в*), милливольтметрами (1 *мв* = 0,001 *в*). Мощность измеряется ваттметрами, киловаттметрами, мегаваттметрами (1 *Мвт* = 1 000 000 *вт* = = 1 000 *квт*). Электроэнергия — счетчиками, коэффициент мощности $\cos\varphi$ — фазометрами. Для измерения частоты служат частотомеры. Измерение сопротивлений (омметрами, измерительными мостами, мегомметрами) представляет собой обширный специальный вопрос и в данной брошюре не рассматривается.

Необходимо отметить, что ряд электрических величин может быть не только измерен путем непосредственного

отсчета по шкале прибора, но и вычислен по показаниям других приборов. Например, $\cos\varphi$ можно и непосредственно измерить фазометром и вычислить (или определить по заранее составленным графикам) на основании показаний ваттметров и счетчиков.

Различают приборы: постоянного тока, переменного тока, постоянного и переменного токов. Надо иметь в виду, что приборы переменного тока в свою очередь разделяются на группы по частоте, при которой они могут применяться. Так, например, щитовыми приборами, рассчитанными на измерение при 50 *гц*, нельзя пользоваться для высокочастотных радиотехнических измерений.

На щитах монтируются щитовые стационарные приборы. Для периодических измерений, например, в процессе испытаний и наладки применяют переносные приборы, причем последние делятся на технические и лабораторные. Лабораторные приборы точнее технических, но их труднее сохранить в заданном классе точности (§ 4). Поэтому не следует стремиться заменять технические приборы лабораторными, если точность технических приборов достаточна для данных конкретных целей. В отдельных случаях необходимо зафиксировать изменения тех или иных величин с течением времени. С этой целью используют регистрирующие приборы, в которых на движущейся с определенной скоростью ленте производится запись измеряемой величины.

Электрические измерения приходится производить в различных условиях. Поэтому одни приборы выпускаются в исполнениях, допускающих работу в сухих отапливаемых помещениях, другие могут работать при больших колебаниях температуры и влажности и т. п. Выпускаются приборы брызгозащищенные, влагозащищенные, герметические, взрывобезопасные и т. п.

Многие электроизмерительные приборы подвержены сильным механическим воздействиям: тряске, вибрации, ударам. Для предотвращения вредных последствий механических воздействий принимаются специальные меры, в результате которых одни приборы обладают повышенной механической прочностью, другие являются тряскопрочными, третьи — вибропрочными и т. п.

Как описано ниже, в каждом электроизмерительном приборе действуют по меньшей мере две силы: одна из

них создает вращающий момент, поворачивающий стрелку слева (от нуля) направо (к наибольшей отметке на шкале). Другая — образует противодействующий момент, который возвращает стрелку справа налево. Стрелка прибора устанавливается на том или ином делении шкалы, когда вращающий и противодействующий моменты уравновешиваются.

Для создания вращающего момента в электроизмерительных приборах используются разные физические явления, в связи с чем измерительные механизмы приборов разделяются на следующие основные системы: магнитоэлектрические (§ 5), электромагнитные (§ 6), электродинамические (§ 7), индукционные (§ 8). Кроме основных систем, распространены: выпрямительная (детекторная § 5) и ферродинамическая (§ 7).

Противодействующий момент может создаваться как механическими средствами (пружинами), так и электрическими с помощью второй рамки. Эти приборы называются логометрами.

Для правильной работы электроизмерительных приборов большое значение имеет защита их измерительных механизмов от влияния внешних магнитных (а в ряде случаев и электрических) полей. В одних приборах защита осуществляется путем экранирования (§ 5), в других — применена конструкция, при которой внешнее поле в равной степени влияет и на вращающий и на противодействующий моменты. Благодаря этому происходит как бы взаимная компенсация, и работа прибора в целом не зависит от внешнего магнитного поля. Такие приборы называются астатическими (§ 6).

Ясно без пояснений, что ток, который может быть пропущен через прибор, равно как и величина напряжения, подводимого к прибору, ограничены значительно меньшими величинами, чем те, которые должны быть приборами измерены. Поэтому, кроме измерительных механизмов, при измерениях широко применяются добавочные сопротивления (§ 11), шунты (§ 10), трансформаторы тока (§ 10) и трансформаторы напряжения (§ 11).

Изложенными сведениями об электроизмерительных приборах далеко не исчерпывается многообразие вопросов, с которыми и приходится сталкиваться при электрических измерениях. Читатели могут значительно расши-

рить свои знания, обратившись к специальной литературе [Л. 2, 4, 5]. Приведенные здесь данные имеют единственной целью обратить внимание на то, что выбор прибора (шунта, добавочного сопротивления, измерительного трансформатора) должен производиться с учетом ряда условий. И поэтому естественно возникает вопрос: как же узнать, пригоден ли тот или иной прибор для данного конкретного измерения?

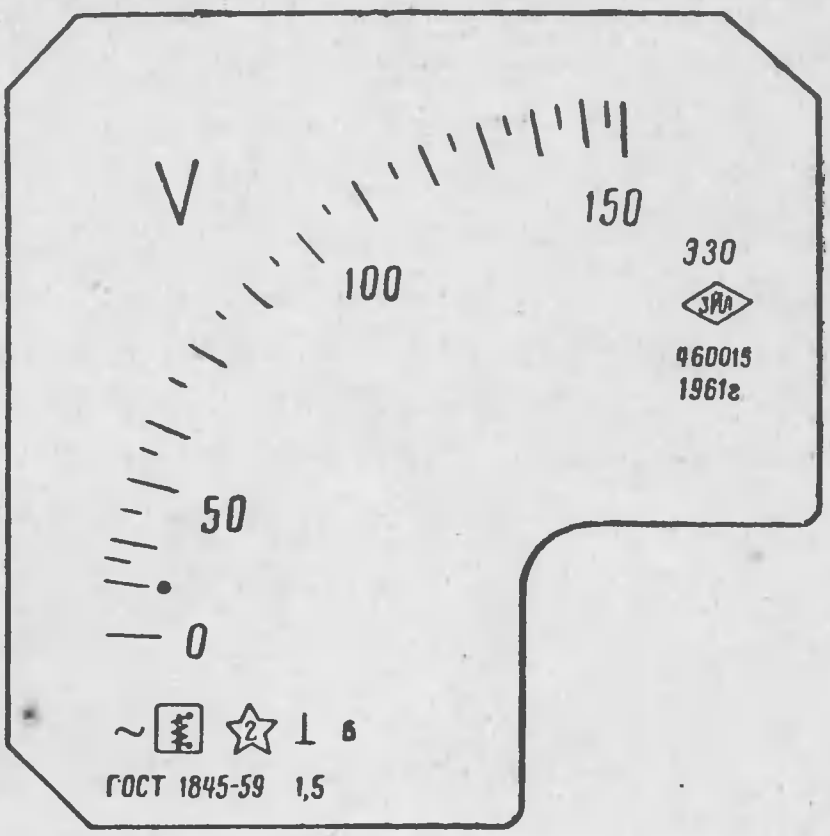
Чтобы ответить на этот вопрос, нужно знать: во-первых, цели измерения и условия его выполнения; во-вторых, в каких случаях какие приборы должны применяться. Об этом написано в следующих параграфах. В третьих, нужно уметь по приборам определять, что они собой представляют. Решить этот вопрос можно, прочитав на шкале прибора знаки, выполненные по стандарту (ГОСТ).

3. МАРКИРОВКА ПРИБОРОВ

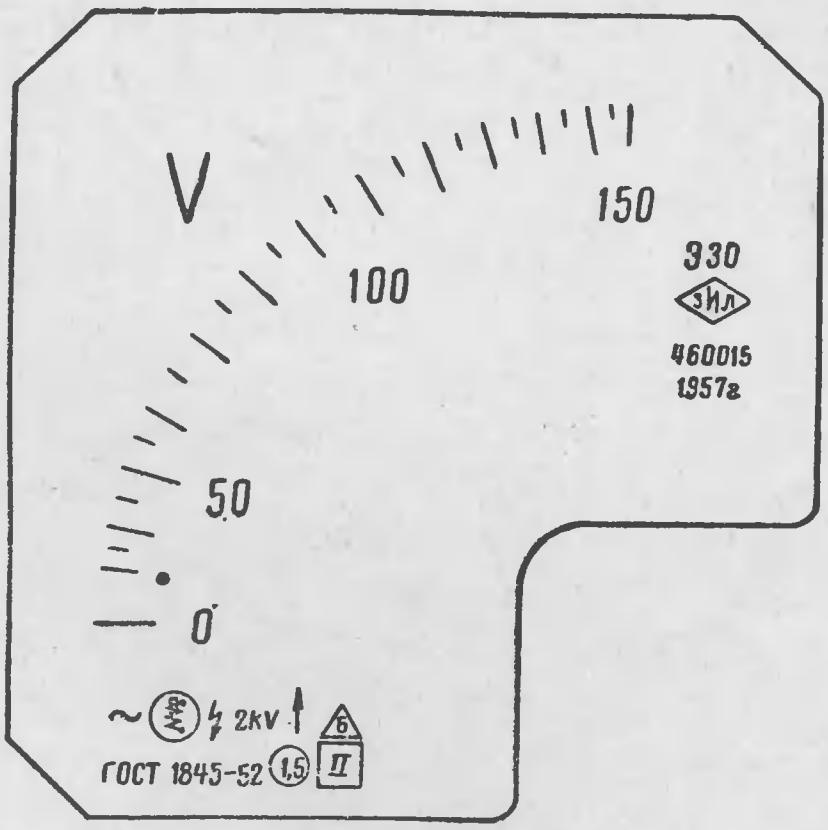
Совокупность знаков на шкале прибора, разметка и обозначение его выводов, а также обозначения на шунтах, добавочных сопротивлениях и измерительных трансформаторах называются маркировкой.

Маркировка шкалы вольтметра дана на рис. 1,*а* (по ГОСТ 1845-59) и 1,*б* (по ГОСТ 2930-45). На шкале обозначены: значение измеряемой величины V (вольт); класс точности прибора 1,5; номер ГОСТ; род тока ~ (переменный однофазный); система прибора (электромагнитный); степень защищенности от влияния внешнего магнитного поля (квадрат, охватывающий знак системы прибора на рис. 1,*а*, указывает на I категорию защищенности; цифра II в квадрате на рис. 1,*б* указывает на II категорию по ГОСТ 1845-52, что соответствует в данном случае I категории по ГОСТ 1845-59); группа Б по условиям эксплуатации (для закрытых сухих неотапливаемых помещений); рабочее положение шкалы (вертикальное); товарный знак завода-поставщика (ЗИЛ); тип прибора (Э30); заводской номер; год выпуска.

Следует иметь в виду, что маркировка приборов, выпускающихся в настоящее время, выполняется по ГОСТ 1845-59. Однако приборы, выпущенные ранее, маркировались по ГОСТ 2930-45, который имеет некоторые отличия. Так, например, иначе обозначаются: величина ис-



а)



б)

Рис. 1. Маркировка приборов.
а — по ГОСТ 1845-59; *б* — по ГОСТ 2930-45.

пытательного напряжения, рабочее положение шкалы (ср. рис. 1,*а* и 1,*б*) и т. п. В табл. 1 и 1а даны извлечения из обоих ГОСТ, причем для удобства сравнения обозначения, имеющие одно и то же значение, помещены рядом.

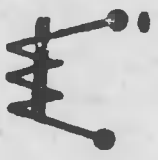
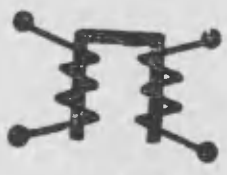
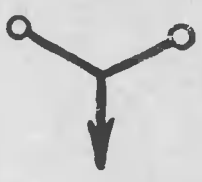
Таблица 1

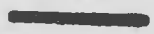
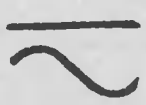
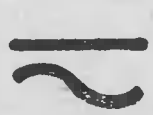
Единица измерения	Условное обозначение на шкале прибора		Единица измерения	Условное обозначение	
	ГОСТ 1845-59 введен с 1/I 1961 г.	ГОСТ 2930-45, ранее действовавший		ГОСТ 1845-59, введен с 1/1 1961 г.	ГОСТ 2930-45, ранее действовавший
Ампер	A	A	Киловатт	kW	kW
Килоампер	kA	kA	Мегаватт	MW	MW
Миллиампер	mA	mA	Вар	VAR	VAR
Микроампер	μA	μA	Киловар	kVAR	kVAR
Вольт	V	V	Мегавар	MVAR	MVAR
Киловольт	kV	kV	Градус угла сдвига фаз	φ	φ
Милливольт	mV	mV	Коэффициент мощности	cos φ	cos φ
Ватт	W	W	Коэффициент мощности реактивный	sin φ	sin φ
			Герц	Hź	Hz

4. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

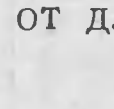
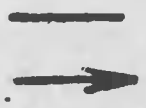
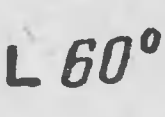
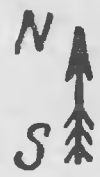
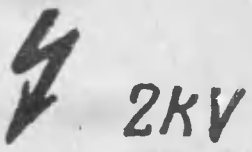
Погрешности приборов. Электроизмерительные приборы не могут давать совершенно точные показания хотя бы потому, что их подвижная система не свободна от трения. Поэтому показание прибора A всегда несколько отличается от действительного значения измеряемой величины $A_д$, за которую при поверках принима-

Таблица 1а

Принцип действия прибора	ГОСТ 1845-59, введен с 1/I 1961 г.	ГОСТ 2930-45, ранее действовавший	
Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой			
Магнитоэлектрический логометр с подвижными рамками			
Электромагнитный прибор			
Электромагнитный логометр			
Тепловой прибор (с нагреваемой проволокой)			
Электродинамический прибор			
Электродинамический логометр			
Ферродинамический прибор			
Ферродинамический логометр			
Индукционный прибор			

Принцип действия прибора	ГОСТ 1845-59, введен с 1/I 1961 г.	ГОСТ 2930-45, ранее действовавший
Индукционный логометр		
Защита от внешних магнитных полей (I категория защищенности)		
Магнитоэлектрический прибор I категории защищенности от магнитных влияний		
Постоянный ток		
Переменный (однофазный) ток		
Постоянный и переменный ток		
Трехфазный ток (общее обозначение)		
Трехфазный ток при неравномерной нагрузке фаз		
Прибор с трехэлементным измерительным механизмом (для четырехпроводной сети)		

Продолжение табл. 1а

Принцип действия прибора	ГОСТ 1845-59, введен с 1/I 1961 г.	ГОСТ 2930-45, ранее действовавший
Обозначения класса точности, положения прибора, прочности изоляции		
Класс точности при нормировании погрешности в процентах от диапазона измерения, например 1,5		
То же, при нормировании погрешности в процентах от длины шкалы, например 1,5		
Горизонтальное положение шкалы		
Вертикальное положение шкалы		
Наклонное положение шкалы под определенным углом к горизонту, например 60°		
Направление ориентировки прибора в земном магнитном поле		
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например 2 *кв*		
Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит		
Генераторный зажим (для ваттметров, варметров и фазометров)		

ется показание образцового (более точного) прибора. Иными словами, приборы имеют некоторую погрешность.

Абсолютная погрешность. Разность между A и $A_д$, выраженная в тех же единицах, в которых выражается данная величина, называется абсолютной погрешностью и обозначается ΔA:

$$\Delta A = A - A_д.$$

Пример 1. Поверяемый амперметр показал $A=20$ *а*, образцовый $A_д=20{,}5$ *а*. Абсолютная погрешность $\Delta A=20\ а-20{,}5\ а=-0{,}5\ а$.

Пример 2. Поверяемый амперметр показал $A=20$ *а*, образцовый $A_д=19{,}5$ *а*. Абсолютная погрешность $20\ а-19{,}5\ а=+0{,}5$ *а*. Из примеров 1 и 2 следует, что абсолютная погрешность имеет знак плюс или минус.

Поправка. При точных измерениях абсолютная погрешность учитывается путем введения поправки. Поправкой называется величина, которая должна быть прибавлена к показаниям прибора, чтобы получить действительное значение измеряемой величины.

Пример 3. Вольтметр показал $A=80$ *в*. По таблице поправок, которая составлена при предыдущей поверке, показанию 80 *в* соответствует поправка $\sigma=-0{,}2$ *в*. Следовательно, действительное значение измеряемой величины ($A_д=A+\sigma$) равно $80\ в+(-0{,}2)=79{,}8$ *в*.

Поправка численно равна абсолютной погрешности, взятой с обратным знаком:

$$\sigma=-\Delta A.$$

Пример 4. При проверке прибора для нескольких делений шкалы определены абсолютные погрешности $+0{,}1$; $+0{,}2$; $-0{,}15$ *в* и т. д. Им соответствуют поправки $-0{,}1$; $-0{,}2$; $+0{,}15$ *в* и т. д.

Относительная погрешность γ_0 измерительного прибора — это отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выраженное в процентах:

$$\gamma_0=\frac{\Delta A}{A_д}100\%.$$

Пример 5. Относительная погрешность в примере 1 равна $\gamma_0=\frac{-0{,}5\ а}{20{,}5\ а}\cdot 100\%=-2{,}44\%$, в примере 2 она составляет

$$\gamma_0=\frac{+0{,}5}{19{,}5}\cdot 100\%=+2{,}56\%.$$

Из примеров видно, что относительная погрешность имеет знак плюс или минус.

Приведенная (основная) погрешность $\gamma_{пр}$ измерительного прибора — выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности ΔA к номинальному $A_н$ (конечному) значению рабочей части шкалы.

Пример 6. Вольтметр со шкалой $A_н = 250$ *в* показал $A = 200$ *в*, показания образцового вольтметра $A_д = 201$ *в*. Следовательно, погрешности: абсолютная $\Delta A = -1$ *в*, относительная $\gamma_0 = -0{,}5\%$ и приведенная $\gamma_{пр} = \frac{-1}{250} \cdot 100\% = -0{,}4\%$.

Пример 7. Ваттметр со шкалой $A_н = 750$ *вт* показал $A = 650$ *вт*, показание образцового прибора $A_д = 649$ *вт*. Следовательно, $\Delta A = 1$ *вт*, $\gamma_0 = 0{,}15\%$, $\gamma_{пр} = 0{,}13\%$.

Обратите внимание: при измерениях одним и тем же прибором на разных участках шкалы, как правило, оказываются различными и абсолютные, и относительные, и приведенные погрешности, причем для всех промежуточных значений шкалы приведенные погрешности всегда меньше относительных.

При одинаковых абсолютных погрешностях двух приборов с различными шкалами при измерении одной и той же величины приведенные погрешности различны.

Пример 8. Пусть действительное значение $A_д = 80$ *в*, абсолютные погрешности при измерениях приборами № 1 и 2 одинаковы, $\Delta A = +1$ *в*. Но прибор № 1 имеет шкалу $0 - 100$ *в* и потому его приведенная погрешность $+1\%$. Приведенная погрешность прибора № 2 со шкалой $0 - 250$ *в* меньше: она равна $+0{,}4\%$. Какой же прибор точнее? Точнее прибор № 2, хотя в данном конкретном случае оба прибора дали одинаковые результаты измерения.

Класс точности прибора. Согласно ГОСТ 1845-59 приборы характеризуются классами точности. Классом точности называется наибольшая допустимая приведенная погрешность.

Пример 9. Прибор имеет шкалу 0—140 *в* и выполнен по классу 1,5. Значит, его приведенная погрешность не более 1,5% от 140 *в*, а абсолютная погрешность не превышает $140\ в \cdot 1{,}5\% : 100\% = \pm 2{,}1$ *в*. Обратите внимание на знаки ±. Они говорят о том, что прибор в данном классе может давать как увеличенные, так и уменьшенные показания. Иными словами, вместо 20, 40, 60, 80, 120, 140 *в* прибор может показать соответственно 22,1 или 17,9 *в*, 42,1 или 37,9 *в*, 62,1 или 57,9 *в*, 82,1 или 77,9 *в*, 122,1 или 117,9 *в*, 142,1 или 137,9 *в*.

Если при поверке прибора необходимо оценить его класс точности (например, после ремонта), то определяют наибольшую приведенную погрешность и считают

классом прибора ближайшую большую из следующих величин: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5.

Пример 10. При поверке вольтметра со шкалой 0—140 *в* отметкам 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 *в* соответствуют приведенные погрешности: 0; —2,1; —2,2; —1,7; +0,1; +1,5; +0,8; +1,2%. Наибольшая из них — 2,2%. Она больше 1,5%, но меньше 2,5%. Значит данный прибор имеет класс точности 2,5.

В настоящее время приняты классы точности согласно табл. 2.

Таблица 2

Наименование прибора (аппарата)	Классы точности	ГОСТ
Стрелочный	0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0	ГОСТ 1845-59
Индукционный счетчик активной энергии	1,0; 2,0; 2,5	ГОСТ 6570-60
Индукционный счетчик реактивной энергии	2,0; 3,0	ГОСТ 6570-60
Измерительный трансформатор тока	0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 10	ГОСТ 7746-55
Измерительный трансформатор напряжения	0,5; 1,0; 3,0	ГОСТ 1983-43
Лабораторный трансформатор тока и напряжения	0,05; 0,1; 0,2; 0,5	ГОСТ 9032-59
Шунт и добавочное сопротивление	0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0	ГОСТ 1845-59

Следует подчеркнуть, что класс точности определяется по основной погрешности. Кроме нее, может иметь место ряд дополнительных погрешностей, обусловленных изменениями температуры по сравнению с нормальной ($+20\pm2^\circ$ С для переносных и $+20\pm5^\circ$ С для щитовых приборов); влиянием отклонения прибора от его рабочего положения, указанного на шкале; влиянием частоты и т. п.

Классы точности измерительных трансформаторов учитывают условия их работы, о чем более подробно рассказано в § 10 и 11.

До сих пор речь шла о погрешностях отдельных приборов и аппаратов. В процессе выполнения измерений нередко применяется не один прибор, а несколько, например амперметр и вольтметр. Приходится также пользоваться не только приборами, но и измерительными трансформаторами, шунтами, добавочными сопротивлениями, проводами, которыми выполняются соединения в цепях измерительных приборов. Каждый из них вносит в измерение свою погрешность. Все эти погрешности могут ухудшать качество измерений (если они одного знака), а могут до некоторой степени взаимно компенсироваться (если они разных знаков). Но так или иначе, погрешность прибора и погрешность измерения — это далеко не одно и то же.

5. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Работа магнитоэлектрического прибора основана на взаимодействии магнитного поля сильного постоянного магнита и измеряемого тока (или тока, ему пропорционального), проходящего по обмотке рамки. Измерительный механизм состоит из неподвижной и подвижной частей (рис. 2,*а*).

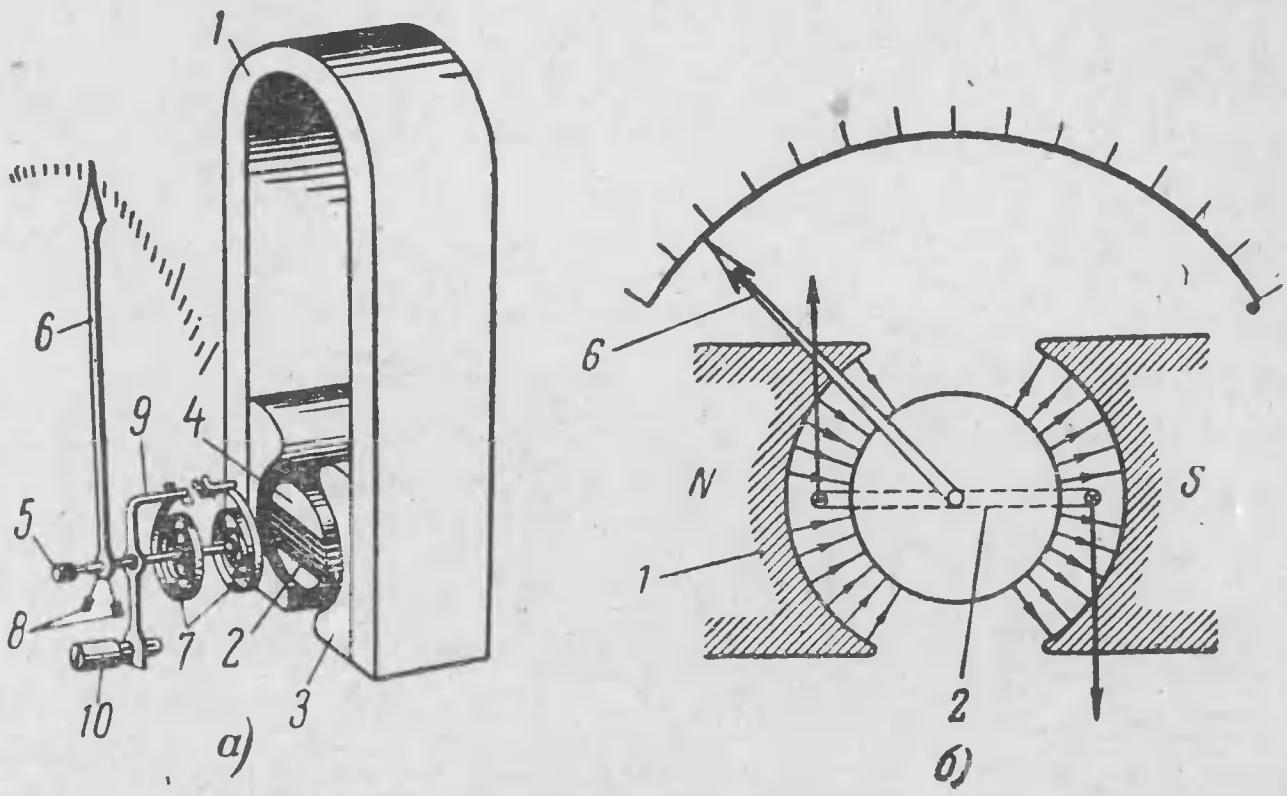


Рис. 2. Схема устройства магнитоэлектрического прибора.

Неподвижная часть измерительного механизма представляет собой постоянный магнит *1* с полюсными

наконечниками *3* и перекрывающей их стальной пластинкой. Стальная пластинка служит магнитным шунтом (на рис. 2 магнитный шунт не виден), положением которого можно регулировать величину индукции в зазоре между полюсными наконечниками и неподвижным стальным цилиндром *4*. Магнитное поле в зазоре практически однородно и радиально (рис. 2,*б*).

Подвижная часть механизма состоит из легкого алюминиевого каркаса (рамки) прямоугольной формы с обмоткой из тонкой изолированной медной или алюминиевой проволоки. Ток к рамке подводится через спиральные пружинки *7*. Рамка *2* охватывает стальной цилиндр *4* и может свободно вращаться между ним и полюсными наконечниками на двух полуосях, входящих в подпятники. На одной полуоси укреплены: стрелка *6*, пружинки *7*, создающие противодействующий момент, и грузики — противовесы — *8*. Перемещая грузики по стержням, добиваются уравновешивания (балансировки) прибора. Балансировка необходима по той причине, что неуравновешенные приборы от действия веса подвижной части механизма дают неправильные показания. Стрелка уравновешенного прибора остается на нуле и в том случае, если прибор с целью проверки балансировки поворачивают так, чтобы его шкала заняла вертикальное положение.

109333

К концу одной из пружинок прикреплен поводок *9* корректора — приспособления для установки стрелки на нуль шкалы. Корректор состоит из поводка с вилкой, которая захватывается стержнем эксцентрично укрепленным в винте *10*.

Винт проходит в отверстие корпуса, и его головка с прорезью для отвертки выступает наружу. Поворачивая винт в ту или иную сторону, можно слегка повернуть ось и установить стрелку на нуль, если она по какой-либо причине сместилась в сторону.

В любом измерительном механизме положение стрелки определяется совместным действием вращающего момента M и противодействующего момента $M_{пр}$. Вращающий момент создается измеряемой величиной и стремится повернуть стрелку вправо. Противодействующий момент в подавляющем большинстве измерительных механизмов, создающийся пружинами, стремится установить стрелку на нуль.

Государственная публичная
библиотека
им. В. Г. Белинского
г. Свердловск

Если M больше $M_{пр}$, стрелка движется вправо. Если $M_{пр}$ больше M, стрелка движется влево. При $M = M_{пр}$ стрелка останавливается.

В магнитоэлектрическом приборе ток, проходя по рамке, создает магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем постоянного магнита, образует вращающий момент. Сила F и вращающий момент M выражаются формулами [1]

$$F = IBlw; \quad M = 2F\frac{b}{2} = IBlbw = IBSw,$$

где I — ток в рамке;

B — магнитная индукция в зазоре;

w — число витков;

b — ширина рамки;

l — активная длина одной стороны рамки;

S — активная площадь рамки.

Противодействующий момент $M_{пр} = D\alpha$, где D — удельный (т. е. соответствующий углу поворота 1°) противодействующий момент пружины, α — угол поворота подвижной части измерительного механизма.

В положении равновесия $IBSw = D\alpha$, откуда $\alpha = I\frac{BSw}{D}$ или $\alpha = IC$, где $C = \frac{BSw}{D}$ *.

Так как C величина постоянная, то угол поворота α пропорционален току в первой степени, следовательно, шкала магнитоэлектрического прибора равномерна.

Магнитоэлектрические приборы не имеют специальных успокоителей. Успокоителем служит каркас рамки: при его движении изменяется магнитный поток, пронизывающий каркас. Индуктирующийся при этом в карка-

---

[1] Здесь и ниже, поскольку речь идет лишь о выявлении характера взаимодействующих величин, а не о их расчете, размерности не указываются. Вращающие и противодействующие моменты в электроизмерительных приборах выражаются в грамм-сантиметрах.

* В формулах, где встречается ряд постоянных величин (как, например, в данном случае: B — индукция постоянного магнита, площадь S рамки, число витков w), их принято обозначать одной буквой (коэффициентом), под которой подразумевается результат вычислений с учетом всех необходимых размерностей.

548—1

се ток взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита и создает тормозной момент, достаточный для быстрого успокоения.

Достоинства магнитоэлектрических приборов: большая точность, высокая чувствительность, малая зависимость от внешних магнитных полей, равномерная шкала, хорошее успокоение, малое потребление мощности.

Недостатки магнитоэлектрических приборов пригодны только для постоянного тока, чувствительны к перегрузкам. При перегрузках пружины перегреваются, изменяют упругость или совсем перегорают.

Несмотря на эти недостатки, магнитоэлектрические приборы получили большое распространение [1].

Выпрямительные приборы. Стремление использовать достоинства магнитоэлектрических систем в сетях переменного тока привело к созданию выпрямительных (детекторных) приборов, представляющих собой сочетание магнитоэлектрического прибора с полупроводниковыми выпрямителями. Последние включаются таким образом, что измеряемый переменный ток, поступающий в рамку прибора, выпрямляется. Следовательно, в приборе действует не переменный ток, а пропорциональный ему выпрямленный. Обычно используются меднозакисные (купроксные), германиевые и реже селеновые выпрямители, монтируемые в корпусе прибора.

Выпрямительные приборы градуируются при синусоидальном переменном токе. Поэтому отклонение формы кривой от синусоиды увеличивает погрешность прибора. Шкала равномерна за исключением начальной части (около 10% шкалы), где она имеет квадратичный характер из-за ухудшения условий выпрямления при небольших напряжениях.

Выпрямительные приборы применяются для измерения небольших величин тока и напряжения в цепях переменного тока с частотой до 10 000 *гц*. Они используются в радиосхемах, в лабораторной и цеховой практике в качестве переносных комбинированных и щитовых приборов.

---

[1] В приложении дана таблица с указанием типов распространенных электроизмерительных приборов.

6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

Работа электромагнитных приборов основана на действии магнитного поля, создаваемого измеряемым током, который проходит по неподвижной катушке, на подвижной сердечник. Выпускаются приборы с плоской (рис. 3,*а*) и с круглой катушками (рис. 3,*б*).

В приборе первого исполнения в щель каркаса плоской катушки *1* входит стальной сердечник *2*, насаженный эксцентрично на ось *3*. На оси укреплены: стрелка, противовесы *4*, спиральная пружина *7* и алюминиевый сектор *5* магнитного успокоителя. При прохождении из-

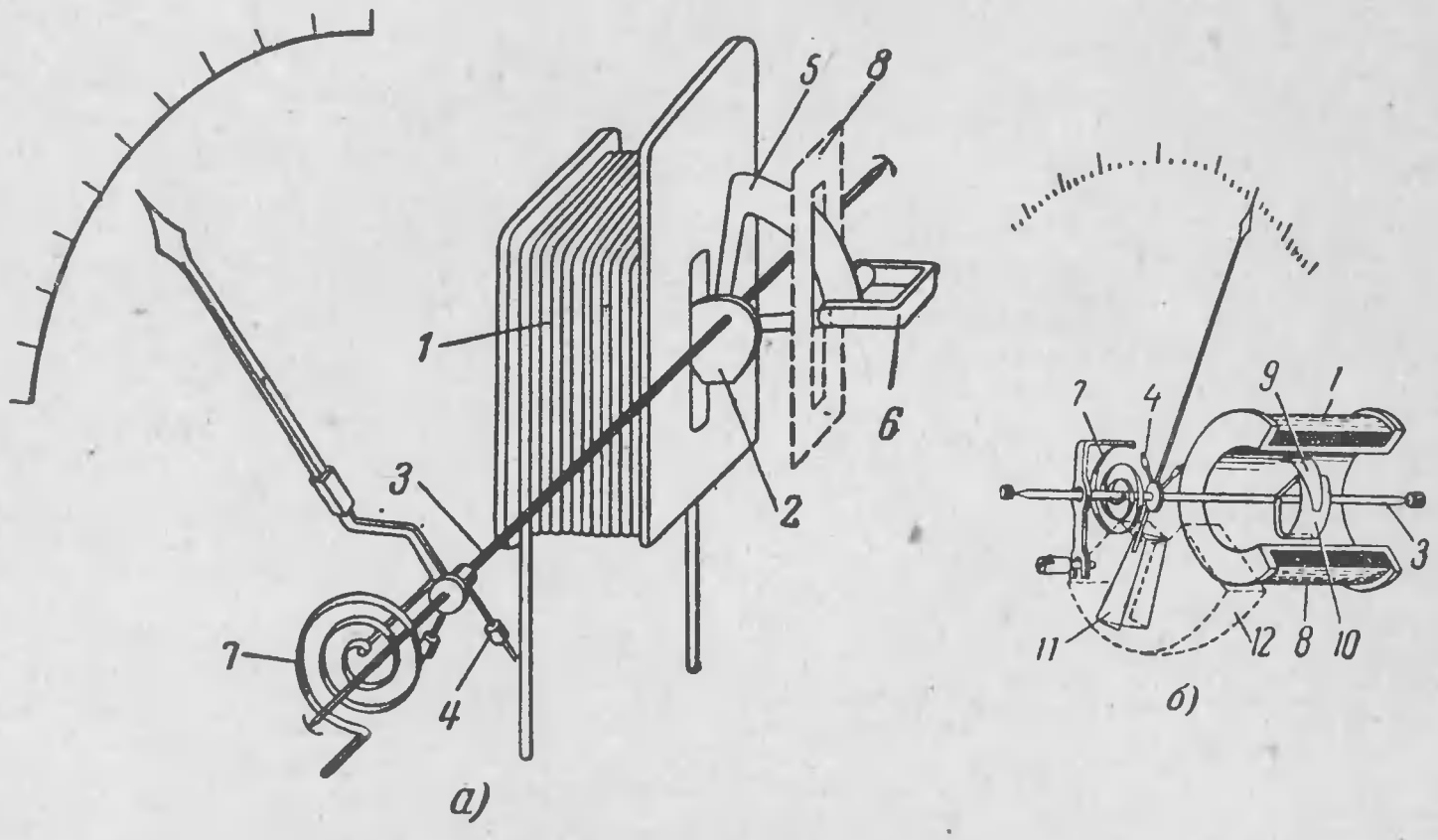


Рис. 3. Схема устройства электромагнитного прибора.
а — с плоской катушкой и магнитоиндукционным успокоителем; *б* — с круглой катушкой и воздушным успокоителем.

меряемого тока по обмотке катушки образуется магнитное поле. Оно втягивает сердечник в щель и поворачивает ось со стрелкой на некоторый угол. В алюминиевом секторе *5*, который при этом движется между полюсами магнита *6*, возникают вихревые токи. Взаимодействуя с полем магнита, они создают тормозящее усилие, успокаивающее колебание стрелки.

На рис. 3,*а* показан экран *8*, защищающий прибор от влияния внешних магнитных полей.

Во втором исполнении прибор имеет круглую неподвижную катушку *1*, внутри которой помещаются два

сердечника: неподвижный *9* и подвижный *10*, укрепленный на оси *3*.

При прохождении измеряемого тока по обмотке катушки создается магнитное поле, намагничивающее оба сердечника, в результате чего подвижный сердечник отталкивается от неподвижного и поворачивает ось и стрелку на некоторый угол. Сердечники изготовляются из магнитомягкой стали или из пермаллоя.

Для иллюстрации различных способов успокоения на рис. 3,*б* показан не магнитоиндукционный, а воздушный успокоитель, состоящий из закрытой камеры *12*, внутри которой перемещается крыло *11*.

Экраном служит стальная пластинка *8*, окружающая катушку.

Для выяснения характера шкалы рассмотрим соотношение взаимодействующих в приборе сил и моментов.

Сила F, действующая на подвижную часть прибора, пропорциональна произведению магнитных индукций поля катушки и намагнитившегося сердечника. Оба эти поля образованы измеряемым током. Следовательно, и сила, и создаваемый ею вращающий момент M, пропорциональны квадрату тока $M=CI^2$. Противодействующий момент $M_{пр}=D\alpha$, как и в рассмотренном выше случае (§ 5), пропорционален углу поворота стрелки. В положении равновесия $M=M_{пр}$, следовательно, $CI^2=D\alpha$, откуда угол поворота

$$\alpha = I^2 \frac{C}{D} = I^2 C_1.$$

Полученный результат показывает, что угол поворота стрелки пропорционален квадрату измеряемого тока, поэтому шкала электромагнитных приборов квадратична. Изменяя форму сердечника, а также расположение его относительно катушки, делают шкалу в ее рабочей части более равномерной.

Сила, действующая на сердечник, при переменном токе не меняет своего направления, так как при изменении направления тока в катушке одновременно меняется направление магнитного потока, а следовательно, и полярность сердечника. Поэтому электромагнитные приборы применяются для измерений не только постоянного,

но и переменного тока. Однако показания электромагнитных приборов в зависимости от магнитных свойств материала сердечника при работе на постоянном и переменном токе отличаются друг от друга на 1—2%. У приборов класса 0,5 разница в показаниях практически отсутствует.

Достоинства электромагнитных приборов: применимость в сетях постоянного и переменного токов, измерение больших токов без применения шунтов и трансформаторов тока, малая чувствительность к перегрузкам; простота конструкции.

Недостатки электромагнитных приборов: неравномерность шкалы, меньшая точность по сравнению с магнитоэлектрическими приборами, зависимость показаний прибора от действия внешнего магнитного поля, что объясняется слабым магнитным полем катушки прибора.

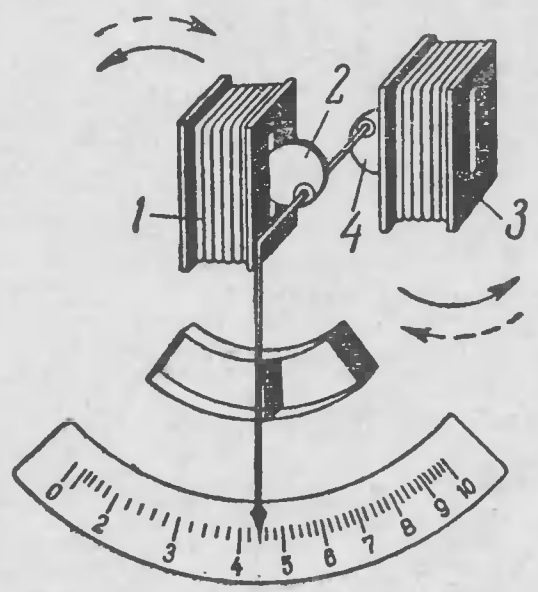


Рис. 4. Схема устройства астатического электромагнитного прибора.

Для защиты от действия внешнего магнитного поля, кроме упомянутого выше экранирования, применяются астатические измерительные механизмы, принцип действия которых иллюстрирует рис. 4. Две одинаковые катушки *1* и *3* соединены так, что создаваемые ими магнитные поля направлены противоположно. В то же время взаимное расположение катушек таково, что оба сердечника *2* и *4,* втягиваясь в щели катушек под действием измеряемого тока, поворачивают стрелку вправо (см. сплошные стрелки на рис. 4). Внешнее же магнитное поле ослабляет поле и момент одной катушки, но на столько же усиливает поле и момент другой катушки (см. пунктирные стрелки). Поэтому общее магнитное поле и общий вращающий момент остаются без изменения.

Астатические приборы дороже экранированных, и поэтому астатические измерительные механизмы применяются только в лабораторных приборах.

Электромагнитные приборы получили широкое распространение.

7. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Работа электродинамического прибора основана на взаимодействии токов, проходящих по обмоткам подвижной и неподвижной катушек. Это взаимодействие создает вращающий момент, действующий на подвижную катушку и стремящийся повернуть ее в положение, при котором энергия магнитного поля катушек будет наибольшей. Электродинамические приборы выполняют-

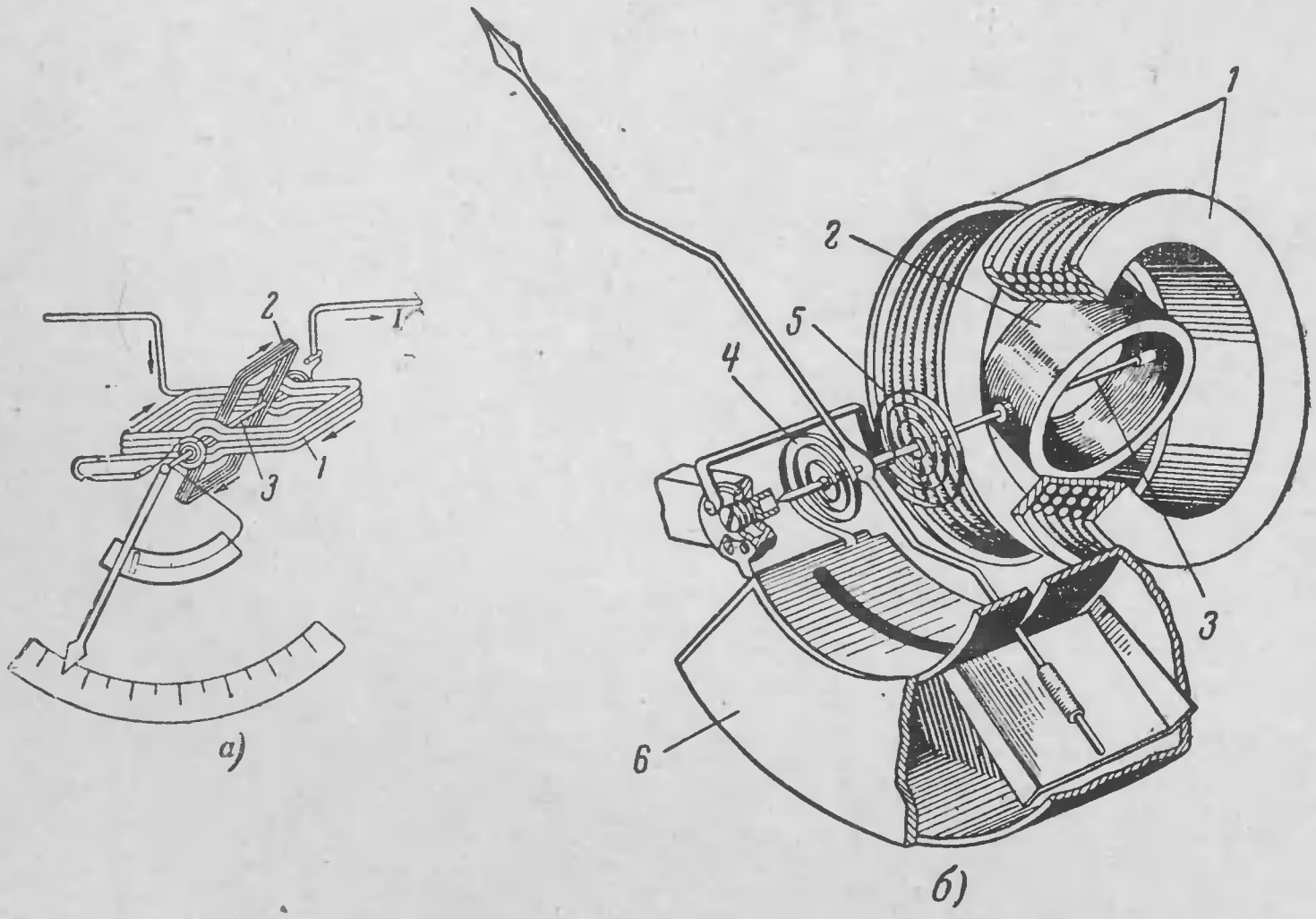


Рис. 5. Схема устройства электродинамического прибора.
а — с плоскими катушками; *б* — с круглыми катушками.

ся либо с плоскими катушками (рис. 5,*а*), либо с круглыми (рис. 5,*б*).

Неподвижная катушка *1* имеет мало витков провода большого сечения (0,5—1,5 *мм*^{2}). Подвижная катушка *2* имеет много витков тонкого провода (0,03—0,08 *мм*^{2}) и укреплена на оси *3*, на которой крепятся также стрелка, две спиральные пружинки *4* и *5* для подвода тока в подвижную катушку и создания противодействующего момента, а также крыло воздушного успокоителя *6*.

Магнитные поля подвижной и неподвижной катушек пропорциональны проходящим через них токам I_1 и I_2. Соответственно сила, действующая на подвижную ка-

тушку, и создаваемый ею момент пропорциональны произведению токов, а также зависят от взаимного расположения катушек $M=C_1I_1I_2$.

Противодействующий момент $M_{пр}=D\alpha$ (см. § 5).

В положении равновесия $M=M_{пр}$, следовательно, $C_1I_1I_2=D\alpha$, откуда угол поворота

$$\alpha=\frac{C_1}{D}I_1I_2=CI_1I_2.$$

При включении прибора в сеть переменного тока вращающий момент и угол поворота подвижной катушки пропорциональны произведению токов в катушках и косинусу угла сдвига фаз между токами.

Промышленность выпускает электродинамические амперметры, вольтметры и ваттметры. В зависимости от назначения прибора неподвижная и подвижная катушки соединяются последовательно, параллельно или имеют раздельное питание.

Амперметры и вольтметры имеют неравномерную шкалу. Это объясняется тем, что вращающий момент в конечном итоге пропорционален произведению токов, проходящих по катушкам. Шкала электродинамических ваттметров равномерна.

Собственное поле электродинамических приборов невелико, поэтому они сильно подвержены действию внешних магнитных полей, для уменьшения которого применяются либо экранирование, либо астатические измерительные механизмы из двух неподвижных и двух подвижных катушек. Катушки соединены и взаимно расположены таким образом, что вращающие моменты, созданные измеряемыми токами, складываются, а моменты, вызванные внешним полем, взаимно компенсируются аналогично тому, как это имеет место в электромагнитных приборах (рис. 4).

Достоинства электродинамических приборов: большая точность; применимость в сетях постоянного и переменного токов.

Недостатки электродинамических приборов: чувствительность к перегрузкам, зависимость показаний от влияния внешнего магнитного поля.

Ферродинамические приборы по принципу действия не отличаются от электродинамических, но их катушки имеют магнитопроводы из ферромагнитных материалов.

460—2

На рис. 6 дана схема устройства ферродинамического прибора. Малое сопротивление магнитопровода позволяет получить большую магнитную индукцию в воздушном зазоре, в которой движется подвижная катушка. Благодаря этому вращающий момент велик.

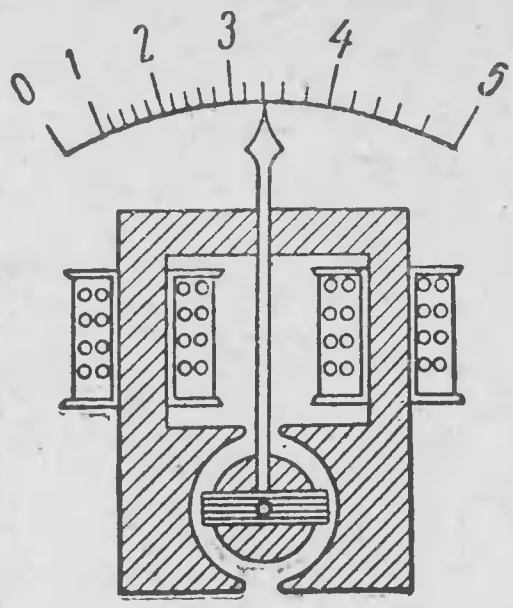


Рис. 6. Схема устройства ферродинамического прибора.

Достоинства ферродинамических приборов: большой вращающий момет, малая зависимость показаний от действия внешнего магнитного поля, так как собственное поле прибора велико, прочность конструкции.

Недостаток ферродинамических приборов: меньшая точность по сравнению с электродинамическими приборами.

Ферродинамические приборы применяются для измерений в сетях переменного тока как промышленной частоты 50 *гц*, так и повышенной. Благодаря большому вращающему моменту промышленность выпускает ферродинамические регистрирующие амперметры, вольтметры, ваттметры и фазометры.

8. ИНДУКЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ И СЧЕТЧИКИ

Работа индукционного прибора основана на взаимодействии магнитных полей, создаваемых переменными токами в двух неподвижных электромагнитах с вихревыми токами, возбуждаемыми этими полями в подвижном алюминиевом диске. Необходимыми условиями работы индукционного прибора являются: сдвиг электромагнитов в пространстве и сдвиг по фазе между токами, проходящими по обмоткам электромагнитов.

Вращающий момент и угол поворота диска пропорциональны произведению магнитных потоков, пронизывающих диск, и синусу угла сдвига фаз между ними. Но так как магнитные потоки пропорциональны возбуждающим им токам, то вращающий момент пропорционален произведению токов и синусу угла сдвига фаз между ними.

Показания индукционных приборов резко зависят от частоты измеряемого им переменного тока, и потому индукционные измерительные приборы не получили боль-

шого распространения. Однако промышленность в огромных количествах выпускает индукционные счетчики электрической энергии однофазного и трехфазного тока. Поэтому дальнейшие пояснения даны на примере рассмотрения работы счетчика.

Однофазный индукционный счетчик имеет следующие основные части (рис. 7): электромагниты *3* с токовой

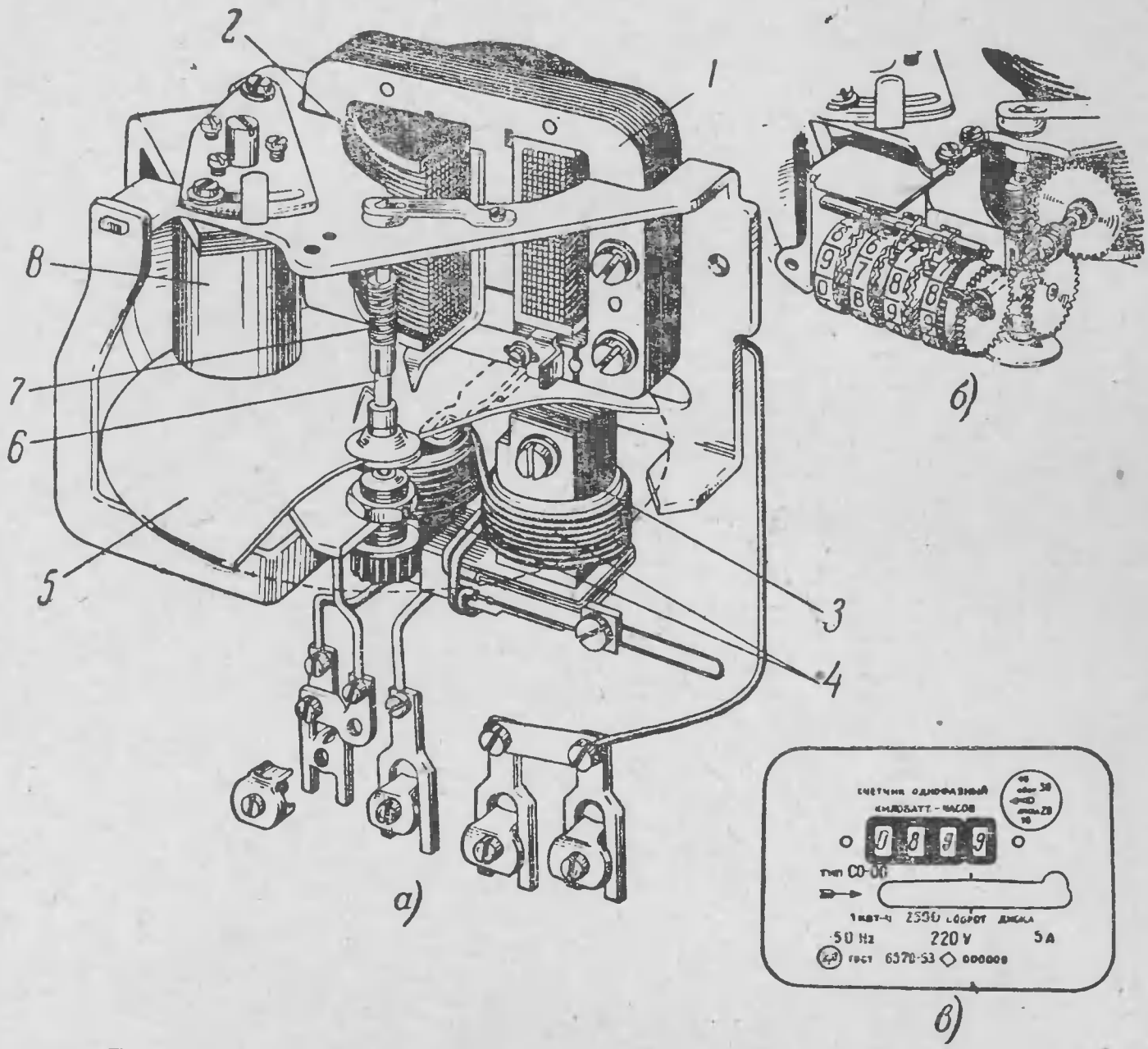


Рис. 7. Счетчик электрической энергии однофазного тока типа СО.

а — измерительный механизм; *б* — счетный механизм; *в* — щиток.

(последовательной) обмоткой *4* из нескольких витков толстого провода (по этой обмотке проходит весь ток нагрузки); электромагнит *1* с обмоткой *2* (параллельной), состоящей из многих витков тонкой проволоки (параллельная обмотка включается в цепь напряжения; алюминиевый диск *5*, на оси *6* которого имеется червяк *7* для передачи оборотов диска счетному механизму и постоянный тормозной магнит *8*.

При прохождении тока *I* по токовой катушке и тока I_u по катушке напряжения возникают магнитные потоки.

Φ_i и Φ_u, которые, замыкаясь по своим магнитопроводам, пересекают диск: магнитный поток Φ_i — в двух местах; магнитный поток катушки напряжения Φ_u — в одном месте. При пересечении диска в нем индуктируются вихревые токи I_{Bi} и I_{Bu}. Взаимодействие магнитного потока токовой катушки Φ_i с вихревыми токами I_{Bu}, создаваемыми магнитным потоком катушки напряжения, и вихревых токов I_{Bi} с магнитным потоком катушки напряжения Φ_u создают вращающий момент, который в счетчике активной энергии пропорционален активной мощности:

$$M = k_1 IU \cos\varphi = k_1 P.$$

Под влиянием вращающего момента диск вращается и при этом пересекает магнитный поток $\Phi_т$ тормозного магнита. Благодаря этому в диске возникают вихревые токи $I_{в.т}$. Последние, взаимодействуя с магнитным потоком $\Phi_т$, создают тормозной момент, который вследствие постоянства $\Phi_т$ равен $M_т = k_2 n$, где n — скорость вращения диска, *об/сек*. При неизменной мощности цепи, в которую включен счетчик, его диск вращается с постоянной скоростью, определяющейся равенством моментов $M = M_т$. Следовательно,

$$k_1 P = k_2 n \text{ и } P = \frac{k_2}{k_1} n = kn.$$

Иными словами, скорость вращения диска счетчика пропорциональна мощности P цепи.

Если в течение времени t в цепи развивается мощность P, то израсходованная энергия A равна:

$$A = Pt = knt = kN,$$

где N — число оборотов за время t.

Из формулы видно, что израсходованная энергия пропорциональна числу оборотов диска, сделанных счетчиком за время измерения.

Коэффициент пропорциональности k для каждого счетчика есть величина постоянная и носит название п о с т о я н н о й с ч е т ч и к а. Таким образом, постоянная счетчика $k = \frac{A}{N}$ есть количество электроэнергии, выраженное в ватт-секундах и приходящееся на один оборот диска.

На щитке счетчика всегда указывается так называемое передаточное число, т. е. количество оборотов диска счетчика, соответствующее единице израсходованной энергии.

Например; „1 киловатт-час = 2 500 оборотов диска“ (рис. 7 *в*).

По передаточному числу легко определить постоянную счетчика. В данном случае она равна:

$$k = \frac{A}{N} = \frac{1\,000\ вт \cdot 3\,600\ сек}{2\,500\ об} = 1\,440\ \frac{вт \cdot сек}{об}.$$

Для регистрации электрической энергии счетчик имеет счетный механизм (рис. 7,*б*).

Достоинства индукционных счетчиков и приборов: прочность конструкции, стойкость при перегрузках, малое влияние внешних магнитных полей благодаря сильному собственному полю.

Недостатки индукционных счетчиков и приборов: пригодность только для переменного тока, меньшая точность по сравнению с приборами других систем, зависимость показаний от частоты, температуры и формы кривой тока.

Промышленность выпускает однофазные и трехфазные индукционные счетчики для учета активной и реактивной энергии.

9. ТЕХНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В следующих параграфах рассматриваются схемы включения электроизмерительных приборов для измерений тока, напряжения, мощности, энергии, коэффициента мощности и частоты. И хотя схемы измерения разных величин различны и для измерения применяются различные приборы, однако в технике любых измерений есть много общего.

В небольшой брошюре нет возможности детально рассмотреть этот сложный вопрос, и читатели могут с ним ознакомиться по специальной литературе. Здесь же обращается внимание на некоторые основные положения.

Прежде чем приступить к измерениям, нужно отчетливо себе представить, что должно быть измерено, в каких условиях и с какой целью. Эти сведения необходимы, чтобы правильно выбрать необходимые приборы

(§ 3), добавочные сопротивления, шунты, измерительные трансформаторы (§ 10 и 11).

Следует составить подробную схему измерения. А если измерение будет производиться в действующей электроустановке, то выяснить маркировку и расположение зажимов, к которым должны присоединяться электроизмерительные приборы.

Нужно приготовить провода для присоединения приборов, убедившись в исправности изоляции и хорошей разделке концов (наконечники, штыри, кольца, отсутствие отделяющихся от общего жгута многопроволочных проводов, жилок и т. п.).

Подготовив в установленном порядке рабочее место и убедившись в наличии необходимых предупреждающих и запрещающих плакатов, ограждений, которые защитят от ошибочных присоединений, случайных обрывов проводов, падения переносных приборов и т. п., собирают схему измерения.

Проверяют (*не включая*!) собранную схему. Особое внимание обращают на присоединения к тем приборам, для которых необходимо соблюдать полярность, правильно присоединять генераторные и общие зажимы, важно направление вращения фаз и т. п.

Принимают меры, предотвращающие повреждение приборов в момент их включения. В первую очередь это относится к многопредельным приборам, которые следует вначале включать на самые большие пределы измерения. Кроме того, при измерениях в цепях с большими индуктивностями и емкостями возможны значительные толчки тока, например зарядного. Полезно миллиамперметры (*но не вольтметры!*) на время включений закорачивать и т. п.

Важно правильно делать отсчет показаний. Во-первых, на прибор всегда нужно смотреть прямо. Если смотреть сбоку, — неизбежна ошибка от бокового отсчета. Совершенно недопустимо в одних случаях смотреть на шкалу слева, в других — справа. Если прибор имеет зеркальную шкалу, то отсчет производят, когда стрелка и ее отражение в зеркале совпадают. Во-вторых, если при измерении нужно одновременно пользоваться несколькими приборами (например, при измерении мощности двумя ваттметрами), то отсчет следует делать строго одновременно по команде одного из участников измерения.

Пользуясь многопредельными приборами, желательно все измерения, результаты которых сопоставляются, производить на одном пределе. Если это требование невыполнимо, то во всяком случае необходимо учитывать, на каком пределе выполнялся тот или иной отсчет показаний. Дело в том, что внутреннее сопротивление одного и того же многопредельного прибора на разных пределах различно, что в ряде случаев можно привести к дополнительным погрешностям.

Наконец, выполнив измерения, необходимо оценить полученные результаты и сделать из них выводы. Измерения без выводов лишены смысла.

10. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА

Для измерения тока амперметр включают последовательно с приемником (нагрузкой), ток которого нужно измерить (рис. 8,*а* и 9,*а*). Чтобы сопротивление амперметра практически не влияло на величину тока, оно должно быть мало по сравнению с сопротивлением приемника. Следовательно, чем больше номинальный ток

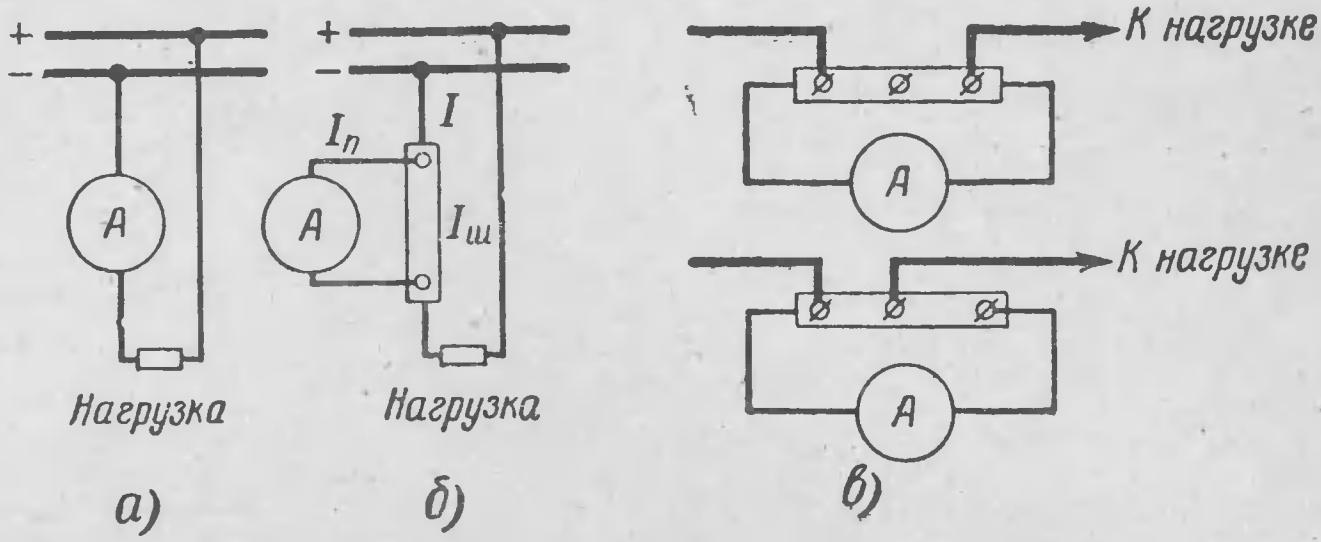


Рис. 8. Измерение тока в сетях постоянного тока.

а — непосредственное включение амперметра; *б* — амперметр присоединен к шунту; *в* — схемы измерений с помощью многопредельного шунта.

амперметра, тем меньше должно быть его сопротивление.

Расширение предела измерения амперметра. Если измеряемый ток больше, чем номинальный ток амперметра, то необходимо расширить пределы его измерения. В сетях постоянного тока с этой целью применяют шунт (рис. 8,*б* и *в*). При измерениях в сетях переменного тока — трансформатор тока (рис. 9,*б*).

Шунт включается последовательно в цепь, в которой производится измерение. Прибор присоединяется параллельно шунту. Таким образом, измеряемый ток I разветвляется: большая его часть $I_ш$ проходит по шунту; меньшая $I_п$ ответвляется в прибор. Распределение токов между шунтом и прибором определяется соотношением их сопротивлений:

$$r_ш = \frac{r_п}{m-1},$$

где $r_ш$ — сопротивление шунта, $r_п$ — сопротивление цепи измерительного механизма (прибора), m — шунтирующий множитель. Шунтирующий множитель показывает, во сколько раз измеряемый ток больше тока в цепи параллельного механизма, или, что то же, во сколько раз расширяется предел измерения.

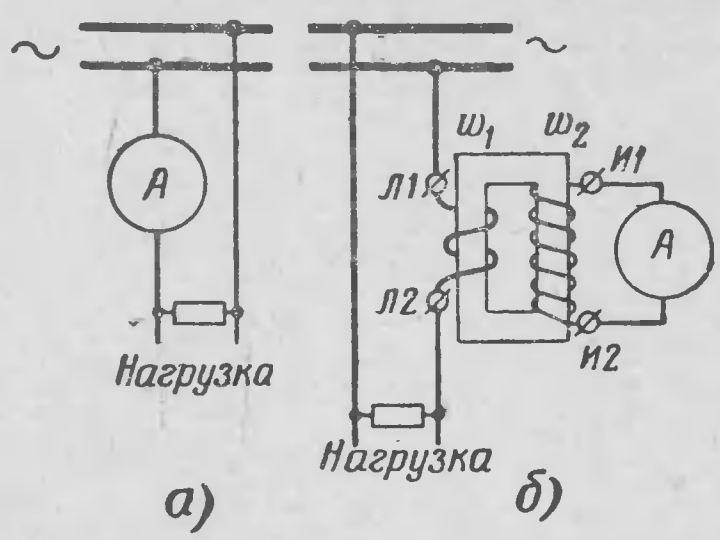


Рис. 9. Измерение тока в сетях переменного тока.

а — непосредственное включение амперметра; *б* — включение амперметра через трансформатор тока.

Пример 11. Миллиамперметром со шкалой 15 *ма* надо измерить ток $I = 15$ *а*, т. е. расширить предел измерения в 15 *а*: 15 *ма* = = 1 000 раз. Сопротивление прибора $r_п = 5$ *ом*.

Шунтирующий множитель $m = \frac{15}{0{,}015} = 1\,000$. Следовательно, шунт должен иметь сопротивление:

$$r_ш = \frac{5}{1\,000-1} = 0{,}005005 \text{ ом}.$$

Шунт представляет собой калиброванное сопротивление из манганина — материала, сопротивление которого практически не зависит от нагревания. Это очень важно, так как шунт нагревается проходящим по нему током. Если бы при нагревании изменялось сопротивление шунта, то показания прибора стали неправильными из-за перераспределения токов между шунтом и прибором.

Ток, проходя по шунту, создает между его зажимами, предназначенными для присоединения прибора, падение напряжения, выражаемое для стандартных шун-

тов величинами 45, 75, 100 или 150 *мв*. Поэтому на приборах, присоединяемых к шунтам, указывается, скольким милливольтам соответствует его полное отклонение.

Пример 12. На шунте написано: 3 000 *а*, 75 *мв*. Шкала прибора имеет 150 делений и на ней написано 75 *мв*. Эти шунт и прибор друг другу соответствуют (оба на 75 *мв*). При токе 3 000 *а* прибор дает полное отклонение на 150 делений. Значит, цена деления 3 000 : 150 = 20 *а*.

Пример 13. Тот же прибор работает с шунтом 600 *а*, 75 *мв*. В этом случае полное отклонение стрелки соответствует 600 *а*; цена деления 600 : 150 = 4 *а*.

Пример 14. На шунте написано: 3 000 *а*, 45 *мв*. Шкала прибора 150 делений, 75 *в*. В данном случае шунт и прибор друг другу не соответствуют. Поэтому при токе 3 000 *а* стрелка прибора укажет не 150 делений (см. пример 12), а меньше, потому что для отклонения на 150 делений нужно 75 *мв*, а в данном случае имеется только 45 *мв*.

Пример 15. Показания прибора для случая, рассмотренного в примере 14, определяются следующим образом. Прибор имеет 150 делений и дает полное отклонение при 75 *мв*. Следовательно, одному делению соответствует 75 : 150 = 0,5 *мв*. При токе 3 000 *а* на зажимах прибора будет 45 *мв*, поэтому отклонение стрелки составит 45 : 0,5 = 90 делений.

Пример 16. Прибор со шкалой 150 делений, 45 *мв* присоединен к шунту 3 000 *а*, 75 *мв*, т. е. шунт и прибор друг другу не соответствуют. Ток 3 000 *а* измерить этим прибором невозможно, так как при 3 000 *а* на зажимах прибора будет 75 *мв*, в то время как для его полного отклонения нужно значительно меньше — напряжение 45 *мв*.

Различают шунты внутренние, встроенные в корпуса приборов, и шунты наружные, которые рассчитаны на большие токи и из-за своих размеров не могут поместиться в корпусе прибора. Наружные шунты бывают индивидуальные, используемые только с приборами, градуированными совместно со своими шунтами, и калиброванные. Последние могут применяться с любыми приборами, имеющими соответствующие пределы измерения. Надо, однако, иметь ввиду, что шунтировать приборы, имеющие внутренние шунты, нельзя.

Как было иллюстрировано в примере 11, шунты имеют очень малое сопротивление. Поэтому сопротивление контактов и соединительных проводов имеет важное значение. Присоединение амперметров к шунтам производится калиброванными проводами с определенным сопротивлением. Соответствующие указания о применении наружного шунта и сопротивлении проводов в необходимых случаях даются на шкалах приборов (§ 3).

В лабораторной практике весьма распространены многопредельные шунты. Два варианта присоединения амперметра к двухпредельному шунту показаны на рис. 8,*в*.

Шунты применяются только при измерениях в сетях постоянного тока. Для расширения пределов измерения амперметров переменного тока пользуются трансформаторами тока.

Первичная обмотка трансформатора тока, обычно с малым числом витков, включается последовательно в рассечку провода, по которому проходит измеряемый ток. Вторичная — с большим числом витков — замыкается на амперметр или последовательные обмотки ваттметра, счетчика и т. п. (рис. 9,*б*).

Трансформатор тока работает в условиях, близких к короткому замыканию, так как сопротивление последовательно соединенных обмоток измерительных приборов, включаемых во вторичную обмотку трансформатора, незначительно (0,2—0,6 *ом*). Отношение токов первичной и вторичной обмоток, а также и числа витков определяется формулой

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = k,$$

где I_1 и w_1 — ток и число витков первичной обмотки;

I_2 и w_2 — ток и число витков вторичной обмотки;

k — коэффициент трансформации.

Вторичный номинальный ток измерительных трансформаторов тока 5 *а*, независимо от первичного тока. Некоторые трансформаторы имеют вторичный ток 1 *а*.

Поэтому амперметры, предназначенные для работы с трансформаторами тока, как правило, исполняются на 5 *а*, независимо от того, к каким трансформаторам тока они присоединяются. Разница заключается лишь в надписях на шкале прибора.

Пример 17. Амперметр со шкалой 0—200 *а*, на которой написано, что он включается с трансформатором тока 200/5, дает полное отклонение при 200 *а* в его первичной обмотке, чему соответствует 5 *а* в цепи амперметра.

Пример 18. Тот же амперметр, если его включить с трансформатором тока 400/5, дает полное отклонение при измеряемом токе 400 *а*, хотя на его шкале написано 200 *а*. Следовательно, оценивая показания амперметров, включенных через трансформаторы тока,

необходимо удостовериться в том, соответствует ли градуировка шкалы данному трансформатору тока. И если не соответствует, то ввести поправочный коэффициент.

Пример 19. Прибор со шкалой 0—200 *а* включен с трансформатором тока 400/5. Поправочный коэффициент 400 : 200 = 2. Это значит, что показания прибора надо умножить на 2. Например, показанию 88 *а* соответствует измеряемый ток 88 *а* · 2 = 176 *а*.

Пример 20. Тот же прибор включен с трансформатором тока 50/5. Поправочный коэффициент 50 : 200 = 0,25. Значит, показания прибора нужно умножать на 0,25 или, что то же, делить на 4. Например, показанию 88 *а* соответствует измеряемый ток 88 *а* · 0,25 = 22 *а*.

Трансформаторы тока обладают двумя видами погрешностей: угловой погрешностью, определяемой углом δ между вектором первичного напряжения и повернутым на 180° вектором вторичного напряжения, и токовой погрешностью, определяемой разностью между номинальным и действительным коэффициентом трансформации.

Погрешности трансформатора тока не являются постоянными величинами для данного трансформатора и изменяются в зависимости: от нагрузки первичной цепи — с уменьшением тока первичной цепи погрешности трансформаторов как по току, так и по углу увеличиваются; от нагрузки вторичной цепи — при нагрузке вторичной цепи выше допустимой (выше номинального сопротивления, обозначенного на паспорте трансформатора) погрешности его также увеличиваются. Под максимальной нагрузкой (номинальным сопротивлением) вторичной цепи подразумевается то наибольшее сопротивление подключаемых приборов и соединительных проводов, при котором погрешности трансформатора не выходят за пределы, указанные в табл. 3 (соответствуют ГОСТ 7746-55).

Если токовая погрешность влияет на показания всех приборов, присоединенных к трансформаторам тока, то угловая погрешность влияет только на приборы, показания которых зависят от cos φ, т. е. на ваттметры и счетчики.

На рис. 9,*б* показана маркировка выводов трансформаторов тока *Л1*, *Л2* для первичной обмотки и *И1*, *И2* — для вторичной. При включении ваттметров и счетчиков (§ 12—14) их присоединение к совершенно определенным выводам имеет большое значение. На работу амперметров перекрещивание проводов не влияет.

Таблица 3

Класс точности	Первичный ток, % номинального	Предельное значение		Пределы вторичной нагрузки, % номинальной при $\cos\varphi = 0{,}8$
		токовой погрешности, % (±)	угловой погрешности, *мин* (±)	
0,5	10	1,0	60	25—100
0,5	20	0,75	50	25—100
0,5	100—120	0,5	40	25—100
1,0	10	2,0	120	25—100
1,0	20	1,5	100	25—100
1,0	100—120	1,0	80	25—100
3	50—120	3,0	Не нормируется	50—100
10	50—120	10	То же	50—100

Один из выводов вторичной обмотки трансформатора тока обычно заземляется для обеспечения безопасности при повреждении изоляции между первичной и вторичной обмотками.

Необходимо всегда помнить, что размыкать цепь вторичной обмотки трансформатора тока *опасно*: при этом на ее зажимах может оказаться значительное напряжение, может повредиться междувитковая изоляция и перегреться до недопустимой величины стальной магнитопровод.

Чтобы в процессе присоединения переносных приборов не размыкать вторичные цепи трансформаторов тока, применяют специальные так называемые испытательные зажимы. Неиспользуемые вторичные обмотки трансформаторов тока обязательно закорачивают. Обращается внимание на то, что в трансформаторах тока с двумя вторичными обмотками имеется два независимых стальных магнитопровода. Поэтому необходимо следить за тем, чтобы каждая вторичная обмотка была замкнута либо на приборы и счетчики, либо закорочена.

11. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Для измерения напряжения на зажимах приемника вольтметр включают параллельно с приемником (рис. 10,*а* и 11,*а*). Чтобы вольтметр не влиял на величину из-

меряемого напряжения сети, ток, проходящий через прибор, должен быть мал. Поэтому сопротивление вольтметра должно быть велико и тем больше, чем выше измеряемое напряжение.

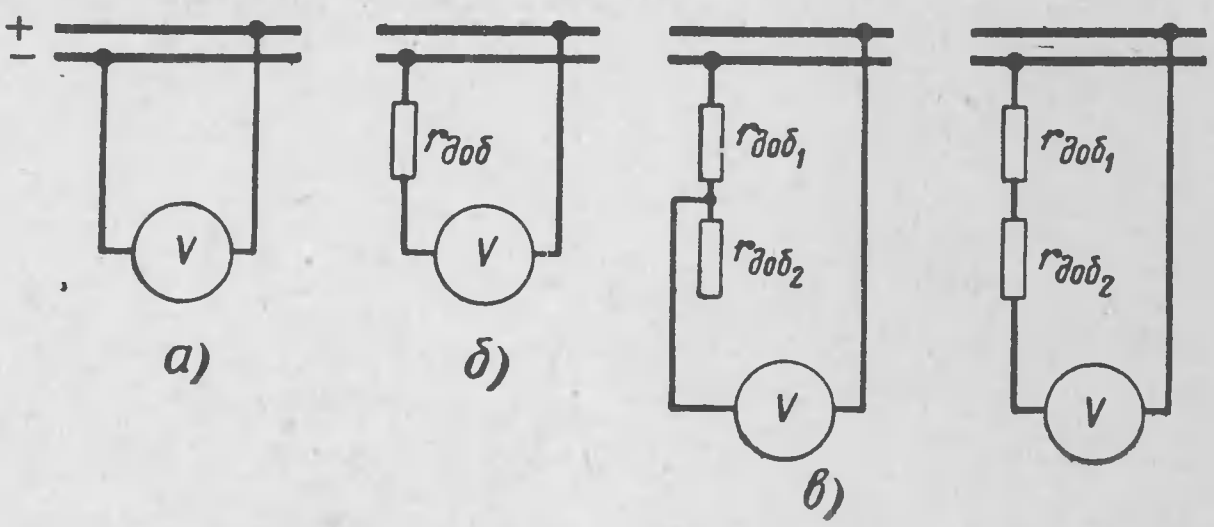


Рис. 10. Измерение напряжения в сетях постоянного тока.

а — непосредственное включение вольтметра; *б* — включение вольтметра с добавочным сопротивлением; *в* — схемы измерений с помощью многопредельных добавочных сопротивлений.

Расширение пределов измерения вольтметра. Если номинальное напряжение вольтметра меньше напряжения сети, в которой требуется произвести измерение, то для расширения пределов измерения включают последовательно с вольтметром добавочное сопротивление. Добавочными сопротивлениями пользуются в сетях постоянного тока (рис. 10,*б* и *в*) и в сетях переменного тока напряжением до 600 *в* включительно. При напряжении переменного тока выше 600 *в* применяют измерительные трансформаторы напряжения (рис. 11,*б*).

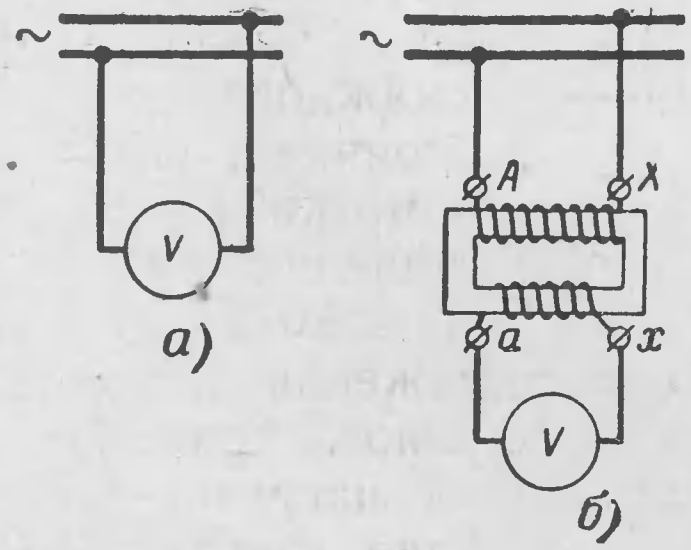


Рис. 11. Измерение напряжения в сетях переменного тока.

а — непосредственное включение вольтметра; *б* — включение вольтметра через трансформатор напряжения.

Величина добавочного сопротивления рассчитывается по формуле: $r_{доб} = r_в(m-1)$, где $r_{доб}$ — добавочное сопротивление, $r_в$ — сопротивление вольтметра, m — множитель — число, показывающее, во сколько раз измеряемое напряжение больше напряжения на измерительном механизме или, иначе, во сколько раз расши-

ряется предел измерения вольтметра при применении добавочного сопротивления.

Пример 21. Переносный вольтметр типа АСТВ на 300 *в* имеет сопротивление $r_в = 10\,000$ *ом*. Чтобы расширить предел измерения до 600 *в*, нужно сначала определить $m = 600\ в : 300\ в = 2$, затем определить $r_{доб} = 10\,000\ (2—1) = 10\,000$ *ом*.

При включении вольтметра через добавочное сопротивление следует всегда помнить, что показания прибора нужно будет умножать на величину m.

Пример 22. Пределы измерения вольтметра расширены в 2 раза (пример 21). Прибор показал 176 *в*. Измеряемое напряжение равно $176 \cdot 2 = 352$ *в*.

Добавочное сопротивление может встраиваться внутрь корпуса прибора или находиться вне его и изготовляться из манганиновой проволоки, наматываемой на каркас из изолирующего материала.

Как уже упоминалось, в электроустановках переменного тока напряжением выше 600 *в* применяются измерительные трансформаторы напряжения. Трансформатор напряжения работает в режиме, близком к режиму холостого хода, так как его вторичная обмотка замкнута на большое сопротивление вольтметра, катушек напряжения ваттметра или счетчика (тысячи ом). Поэтому ток в его обмотках относительно мал.

Коэффициент трансформации для каждого трансформатора напряжения — величина постоянная, равная отношению числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки, или же отношению первичного напряжения ко вторичному при холостом ходе.

Погрешности трансформаторов напряжения не являются постоянными величинами для данного трансформатора и изменяются в зависимости: от нагрузки первичной цепи и вызываемого ею изменения первичного напряжения, но так как напряжение изменяется в небольших пределах, то его влияние для большинства трансформаторов несущественно; от нагрузки вторичной обмотки, поэтому для каждого трансформатора напряжения указывается его номинальная мощность, по которой можно определить, сколько приборов допустимо присоединить к трансформатору напряжения.

Погрешности трансформаторов напряжения при частоте 50 *гц*; значениях первичного напряжения U_1 от 0,9 $U_н$ до 1,1 $U_н$; отдаваемой основной вторичной обмоткой

мощности от $0{,}25\left(\frac{U_1}{U_н}\right)^2 P_н$ до $\left(\frac{U_1}{U_н}\right)^2 P_н$, где $U_н$ — номинальное напряжение трансформатора, $P_н$ — номинальная мощность трансформатора, и коэффициенте мощности нагрузки основной вторичной обмотки, равном 0,8, соответствуют данным табл. 4.

Таблица 4

Класс точности трансформатора	Максимальная погрешность	
	напряжение, % (±)	угловая, *мин* (±)
0,5	0,5	20
1	1	40
3	3	Не нормируется

Погрешность по напряжению влияет на показания всех приборов. Угловая погрешность сказывается только на тех приборах, показания которых зависят от cos φ, т. е. на ваттметрах и счетчиках.

Вторичное номинальное напряжение трансформаторов напряжения $U_2 = 100$ или 110 *в* [1].

На рис. 11,*б* показана маркировка выводов однофазных трансформаторов напряжения. Начало первичной обмотки обозначается *A*, конец — *X*. Начало вторичной обмотки обозначается *a*, конец — *x*. Выводы трехфазных трансформаторов обозначаются *A*, *B*, *C* и соответственно *a*, *b*, *c*.

На показания вольтметров перекрещивание проводов не влияет. Однако присоединение ваттметров и счетчиков к совершенно определенным выводам трансформаторов напряжения является обязательным (§ 12—14).

Один из выводов вторичной обмотки трансформатора напряжения обычно заземляется для обеспечения безопасности при повреждении изоляции между первичной и вторичной обмотками.

Замыкать накоротко вторичную обмотку трансформаторов напряжения нельзя. Необходимо всегда помнить о крайней *опасности* обратной трансформации. Об-

[1] Определение цены деления прибора, включенного через трансформатор напряжения, иллюстрируется в § 12 примером 29.

ратная трансформация — это появление высокого напряжения на выводах отключенного от сети трансформатора напряжения, если на его вторичную обмотку по каким-либо причинам попало низкое напряжение.

12. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Измерение мощности занимает в технике электрических измерений особое место ввиду относительной сложности. Для правильного присоединения ваттметра совершенно необходимо соблюдать вполне определенный порядок присоединения его генераторных выводов (отмеченных звездочкой) к сети или к выводам трансформаторов тока.

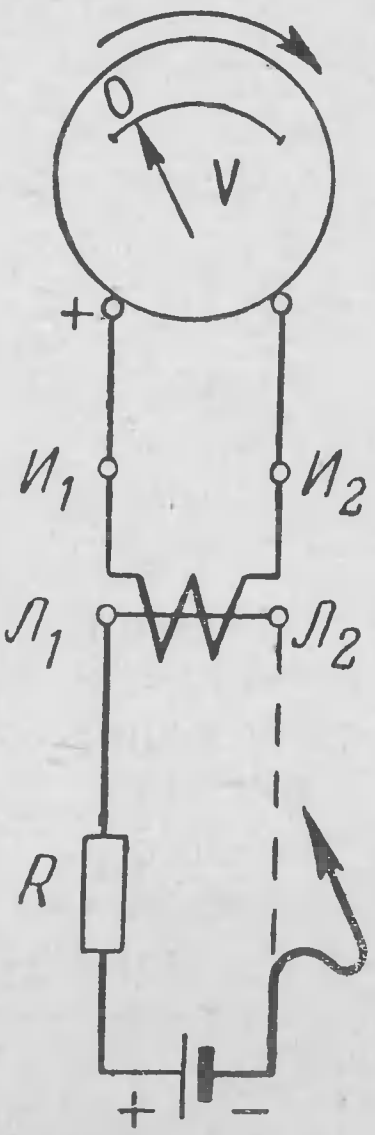


Рис. 12. Разметка (определение) выводов измерительных трансформаторов.

В библиотеке электромонтера издан специальный выпуск (№ 62), в котором весьма детально рассматривается комплекс вопросов по измерению мощности [Л. 4]. Он предназначен для читателей, специально занимающихся электроизмерениями. В этой брошюре даются более краткие сведения, необходимые только для повседневных измерений.

Как уже упоминалось (§ 10 и 11), выводы измерительных трансформаторов должны иметь обозначения. Если на измерительных трансформаторах они отсутствуют, то пользуются простым способом определения начала и конца обмоток. Для этого чувствительный магнитоэлектрический вольтметр (лучше) или миллиамперметр (хуже) и батарейку для карманного фонаря включают точно по схеме рис. 12. Если при включении первичной обмотки (*Л1*, *Л2*) стрелка прибора отклоняется в правую сторону, это значит, что плюс прибора и плюс батарейки присоединены к началу обмоток; на них следует написать *Л1* и *И1*. Другие выводы соответственно обозначаются *Л2* и *И2*. Аналогично выполняется определение начал и концов обмоток трансформаторов

напряжения. Обратите внимание: испытания должны по соображениям безопасности производиться при напряжении 2—10 *в*, не выше.

Измерения в однофазной сети. Ваттметр, включенный по схеме рис. 13,*а*, непосредственно показывает мощность $P = IU\cos\varphi$.

Зажимы прибора, обозначенные звездочкой (начала), надо присоединять к проводам, идущим со стороны питания (генератора). При неправильном присоединении одной из катушек прибора его стрелка отклонится в обратную сторону.

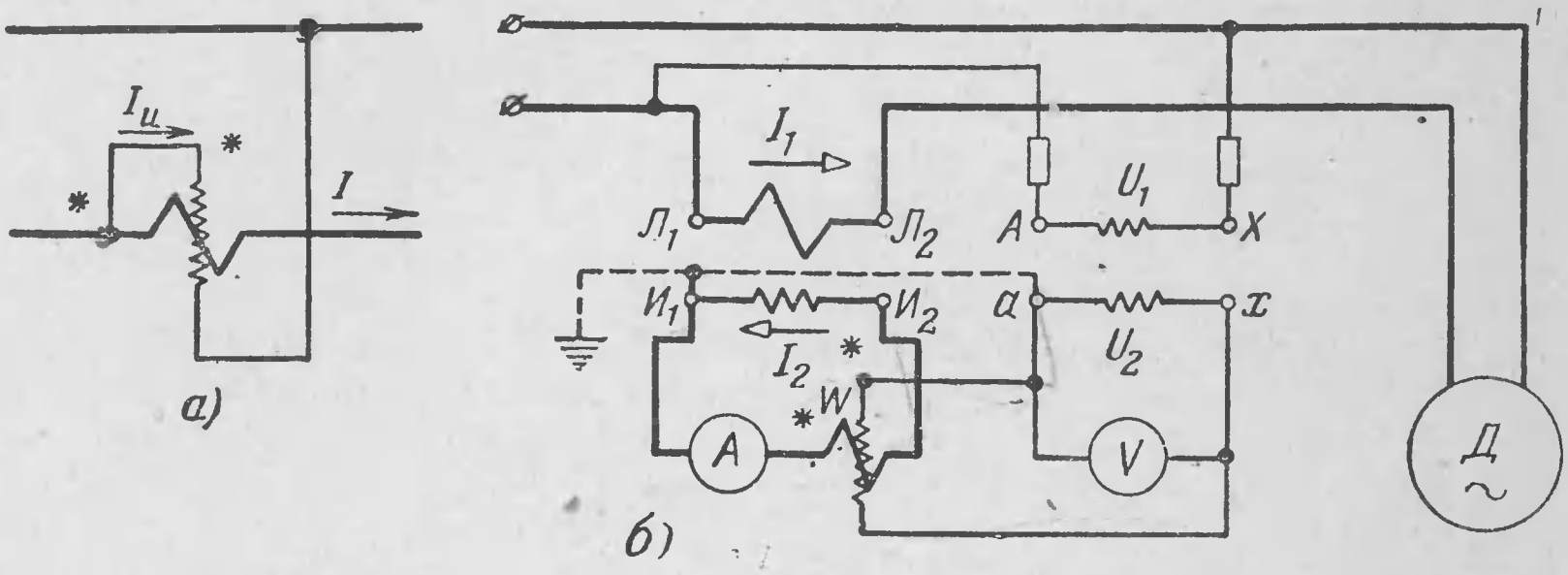


Рис. 13. Измерение активной мощности однофазного тока.
а — непосредственное включение ваттметра; *б* — включение ваттметра через измерительные трансформаторы.

На рис. 13,*б* показано присоединение ваттметра *W* через трансформатор тока и трансформатор напряжения. На схеме показано также включение амперметра *A* и вольтметра *V*.

Измерения в трехфазной трехпроводной сети при равномерной нагрузке фаз и симметричных напряжениях.

1-й случай. Нулевая точка доступна. Измерение производится одним однофазным ваттметром по схеме рис. 14,*а*. Как видно из схемы, через последовательную обмотку ваттметра проходит фазный ток, параллельная обмотка находится под фазным напряжением, следовательно, ваттметр измеряет $P_ф = I_ф U_ф \cos\varphi$. Для определения мощности трехфазной сети нужно показание ваттметра умножить на 3.

Пример 23. Ваттметр показал 674 *вт*. Измеряемая мощность 674 *вт* · 3 = 2 022 *вт*.

2-й случай. Нулевая точка недоступна.

Необходимо создать искусственную нулевую точку и включить ваттметр по схеме рис. 14,*б*. Искусственная нулевая точка обра-

зуется при соединении в звезду параллельной обмотки ваттметра и двух сопротивлений r_b и r_c, каждое из которых равно сопротивлению обмотки.

Измерение в трехфазной трехпроводной сети при равномерной или неравномерной нагрузке фаз, симметричном или несимметричном напряжении. Измерение выполняется двумя однофазными ваттметрами по схеме рис. 15. Токовые катушки ваттметров включаются в любые две фазы, а катушки напряжения — в фазу, свободную от токовых катушек.

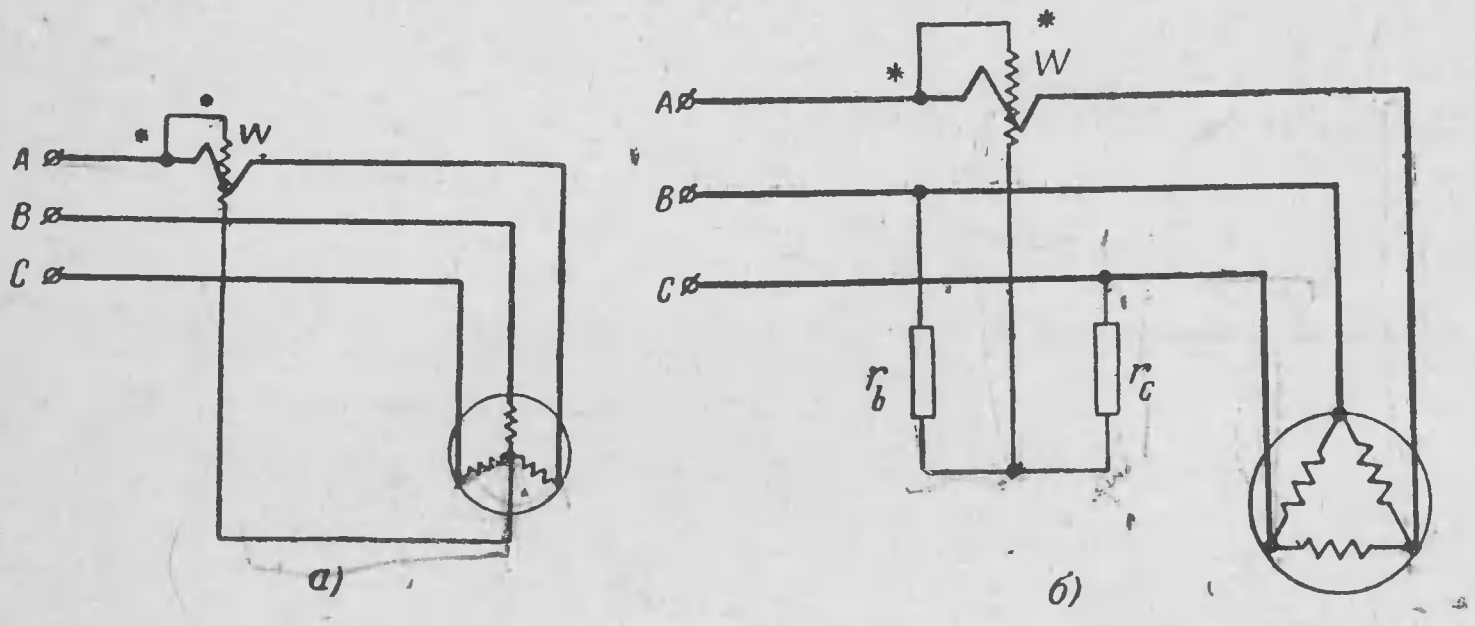


Рис. 14. Измерение активной мощности трехфазного тока однофазным ваттметром при равномерной нагрузке фаз.
а — нулевая точка приемника тока (электродвигателя) доступна; *б* — нулевая точка недоступна.

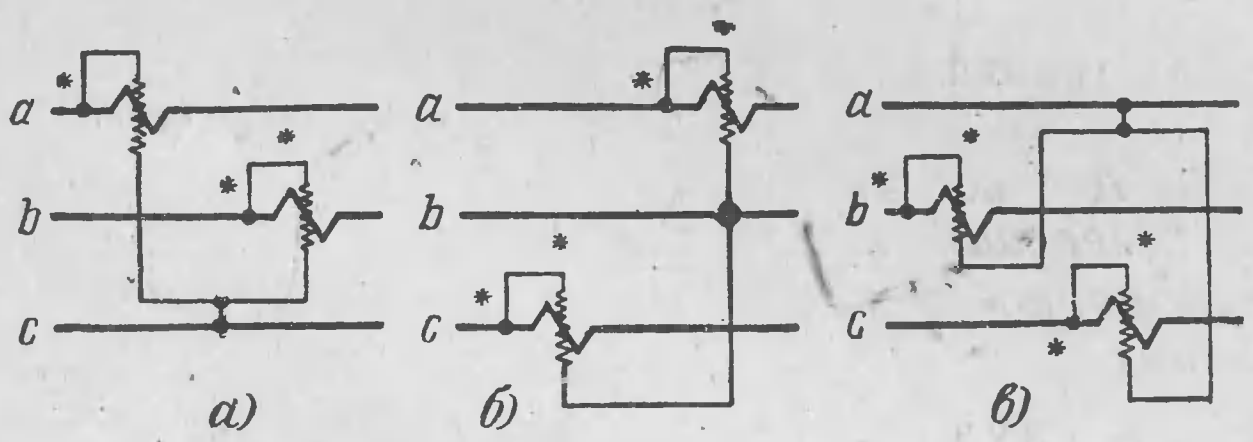


Рис. 15 Измерение активной мощности трехфазного тока двумя ваттметрами в трехпроводной сети.

Мощность трехфазной сети определяется суммой показаний двух ваттметров $P=P_1+P_2$.

При измерениях по этой схеме могут быть следующие характерные случаи.

1-й случай. Нагрузка фаз равномерна, $\cos\varphi=1$. Ваттметры дают одинаковые показания.

Пример 24. Оба ваттметра показывают по 720 *вт*. Следовательно, измеряемая мощность $P = 720$ *вт* $+ 720$ *вт* $= 1\,400$ *вт*, $\cos\varphi = 1$.

2-й случай. $\cos\varphi$ меньше 1, но больше 0,5. Нагрузка фаз любая. Стрелки ваттметров отклоняются в одну сторону, но их показания различны.

Пример 25. Один ваттметр показывает 600 *вт*, другой 400 *вт*. Измеряемая мощность $P = 600$ *вт* $+ 400$ *вт* $= 1\,000$ *вт*, $\cos\varphi$ больше 0,5.

3-й случай. При $\cos\varphi = 0{,}5$ один ваттметр показывает 0.

Пример. 26. Один прибор показывает 976 *вт*, другой — 0. Измеряемая мощность 976 *вт*, $\cos\varphi = 0{,}5$.

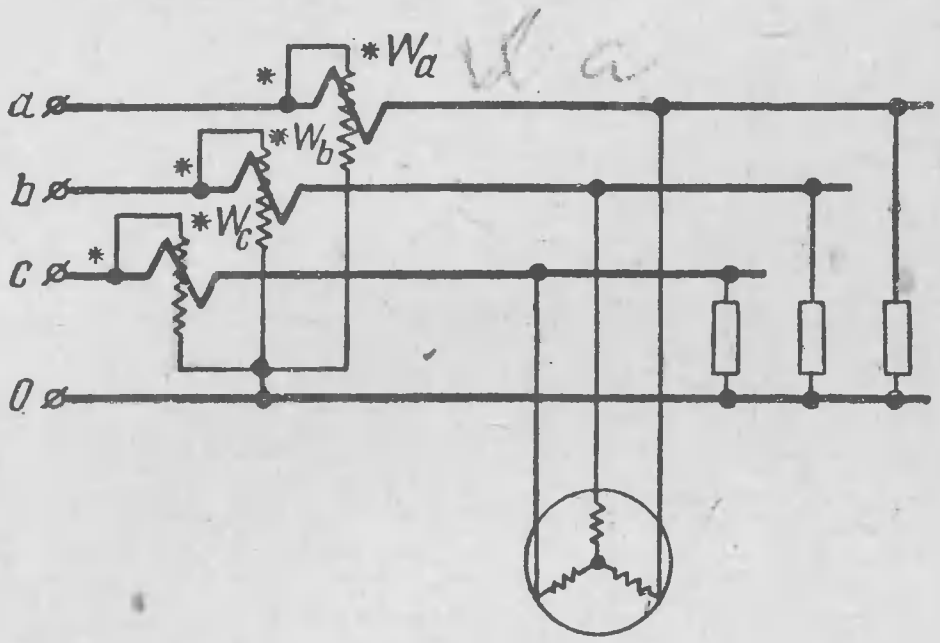


Рис. 16. Измерение активной мощности трехфазного тока в четырехпроводной сети.

4-й случай. При $\cos\varphi$ меньшем 0,5, показание одного ваттметра отрицательно (стрелка отклоняется влево). Чтобы сделать отсчет, необходимо изменить направление тока в одной из катушек (обычно в катушке напряжения) и, сделав отсчет, прибавить показание со знаком минус (или, что то же, вычесть меньшее показание из большего).

Пример 27. Один прибор показывает 700 *вт*, стрелка другого уходит за нуль влево. После переключения он показывает 60 *вт*. Измеряемая мощность $P = 700$ *вт* $+ (-60$ *вт*$) = 700$ *вт* $- 60$ *вт* $= 640$ *вт*.

Измерение по схеме рис. 15 (схема Арона) дает правильные показания, независимо от способа соединения нагрузки.

Измерения в четырехпроводной сети при любой нагрузке. Измерение выполняется тремя однофазными ваттметрами по схеме рис. 16. Каждый ваттметр учитывает мощность в соответствующей фазе. Полная мощность трехфазной сети равна сумме их показаний $P = P_1 + P_2 + P_3$.

Пример 28. Показания приборов составляют 210, 437 и 159 *вт*. Измеряемая мощность $P = 210$ *вт* $+ 437$ *вт* $+ 159$ *вт* $= 806$ *вт*.

Трехфазные ваттметры. Измерение на распределительных щитах промышленных установок однофазными ваттметрами представляет большие неудобства, требуя одновременного отсчета по двум или трем приборам. Поэтому широкое применение нашли трехфазные ваттметры, указывающие непосредственно мощность трехфазного тока. В трехфазном ваттметре в одном корпусе объединены два или три однофазных элемента, такие же, как в однофазном ваттметре. Их вращающие моменты действуют на общую ось.

При включении трехфазных ваттметров надо точно соблюдать разметку зажимов, т. е. следить за правильным подключением начал и концов обмоток. Если в однофазном ваттметре неправильное подключение будет быстро обнаружено благодаря обратному отклонению стрелки, то в трехфазном ваттметре неправильное подключение обмоток отклонит стрелку только на меньший или больший угол, из-за чего ошибка не может быть обнаружена сразу.

Измерение мощности через измерительные трансформаторы. При измерении мощности в однофазной или трехфазной сетях, токи которых превышают номинальные токи ваттметров, а также при измерениях в сетях высокого напряжения ваттметры включают через измерительные трансформаторы. В сетях с напряжением до 600 *в* трансформатор напряжения заменяется обычно добавочным сопротивлением (рис. 17). Ясно, что при соединениях по схеме рис. 17 *заземлять* вторичные обмотки трансформаторов *нельзя*.

На рис. 18 приведена схема включения полного комплекта приборов для измерения тока, напряжения и мощности в сети высокого напряжения. При измерении мощности в сетях переменного тока с применением измерительных трансформаторов могут быть случаи:

1) Измерительный прибор (ваттметр, амперметр или вольтметр) предназначен для постоянной совместной работы с определенными измерительными трансформаторами. Тогда шкала прибора градуируется непосредственно в величинах, соответствующих первичной сети. На шкале указываются коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов.

2) Измерительные приборы не предназначены для постоянной совместной работы с какими-нибудь изме-

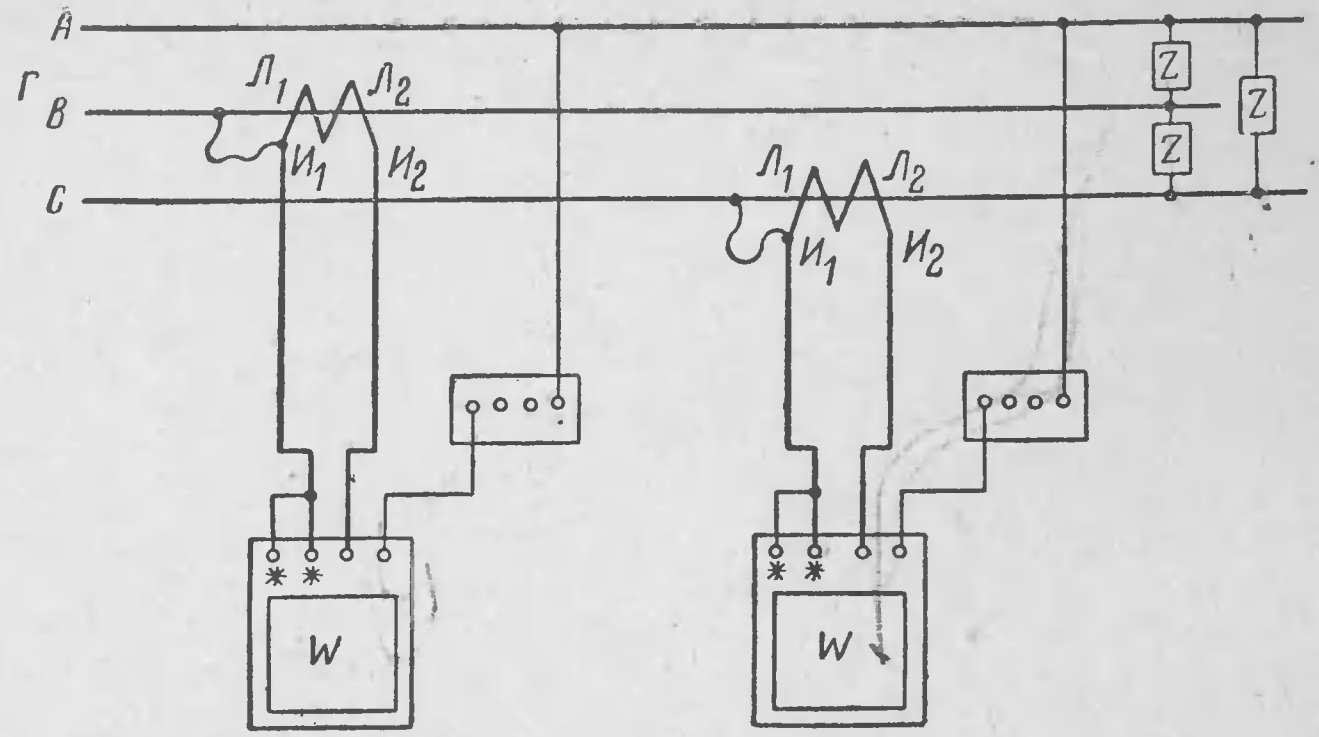


Рис. 17. Включение ваттметров через трансформаторы тока и добавочные сопротивления в сети напряжением до 600 *в*.

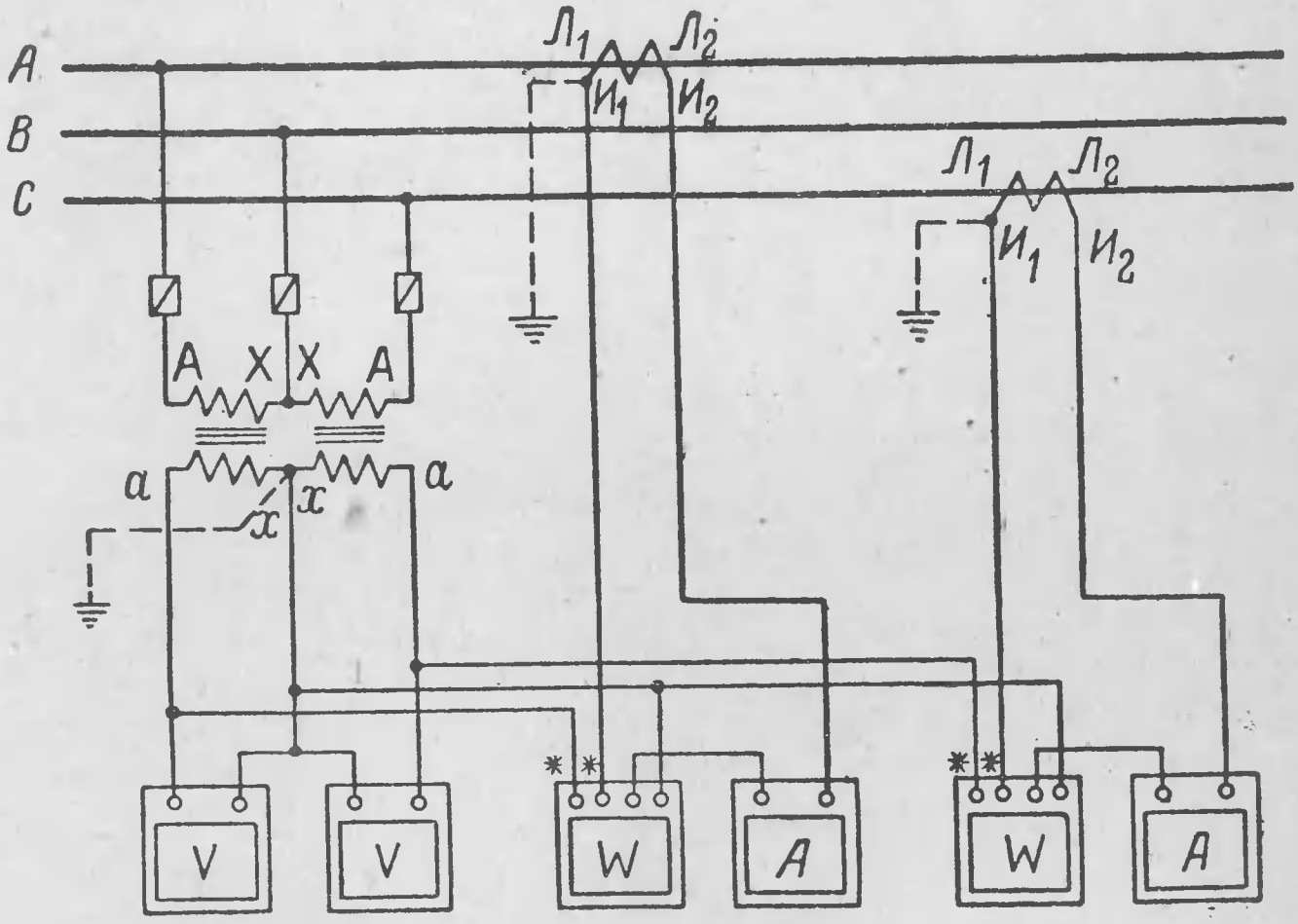


Рис. 18. Включение комплекта приборов для измерения напряжения, тока, мощности в трехпроводной сети трехфазного тока высокого напряжения.

рительными трансформаторами. Тогда на приборах обозначаются величины, непосредственно действующие на их обмотки (например, 100 *в*, 5 *а*), а на шкалы лабораторных приборов наносятся только деления без указания измеряемой величины. Показания приборов нужно умножать на коэффициенты измерительных трансформаторов.

Пример 29. Приборы включены по схеме рис. 18 и имеют следующие номинальные данные:

а) ваттметры: 5 *а*, 150 *в*, 100 делений;
б) амперметры: 5 *а*, 100 делений;
в) вольтметры: 150 *в*, 150 делений;
г) трансформаторы тока 200/5 *а*;
д) трансформатор напряжения 6 000/100 *в*.

При измерениях один ваттметр показал 120 делений, второй — 100 делений, амперметр — 120 делений, вольтметр — 101 деление.

Для определения активной мощности, тока и напряжения сети нужно определить цену деления каждого прибора, что легко выполняется по его номинальным данным.

Действительно, при 5 *а* и 150 *в* ваттметр, измеряя 5 *а* · 150 *в* = 750 *вт*, показывает 150 делений. Значит, цена одного деления 750 *вт* : 150 = 5 *вт*. Стрелка амперметра при 5 *а* отклонится на 100 делений. Значит, цена деления амперметра 5 *а* : 100 = 0,05 *а*. Цена деления вольтметра 150 *в* : 150 = 1 *в*.

Далее необходимо вычислить коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов. Для этого первичный ток (напряжение) делят на вторичный ток (напряжение). В нашем случае коэффициент трансформации трансформатора тока 200 *а* : 5 *а* = 40, трансформатора напряжения 6 000 *в* : 100 *в* = 60.

Согласно условию один ваттметр показал 120 делений. Умножая 120 на цену деления (5 *вт*), коэффициенты трансформации трансформатора тока (40) и трансформатора напряжения (60), определяем мощность $P_1 = 120 \cdot 5$ *вт* $\cdot 40 \cdot 60 = 1\,440\,000$ *вт* $= 1\,440$ *квт*.

Второй ваттметр показал 100 делений, измерив $P_2 = 100 \cdot 5$ *вт* $\times$ $\times 40 \cdot 60 = 1\,200\,000$ *вт* $= 1\,200$ *квт*.

Активная мощность трехфазной сети $P = P_1 + P_2 = 1\,440$ *квт* $+$ $+ 1\,200$ *квт* $= 2\,640$ *квт*.

Аналогично определены ток $120 \cdot 0{,}05 \cdot 40 = 240$ *а* и напряжение $101 \cdot 1 \cdot 60 = 6\,060$ *в*.

13. ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Реактивную мощность можно измерять обычным ваттметром, руководствуясь следующими зависимостями.

Активная и реактивная мощности определяются формулами: $P = IU \cos \varphi$ и $Q = IU \sin \varphi$,

где I — ток, протекающий по последовательной обмотке ваттметра;

U — напряжение, приложенное к его параллельной обмотке;

φ — угол между вектором тока I и вектором напряжения U (рис. 19).

Если включить ваттметр так, чтобы угол между вектором тока I и напряжением был бы не φ, а $90°-\varphi$, т. е. при-

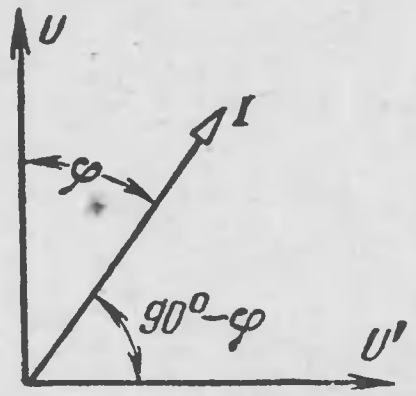


Рис. 19. Векторная диаграмма, иллюстрирующая принцип включения ваттметра для измерения реактивной мощности.

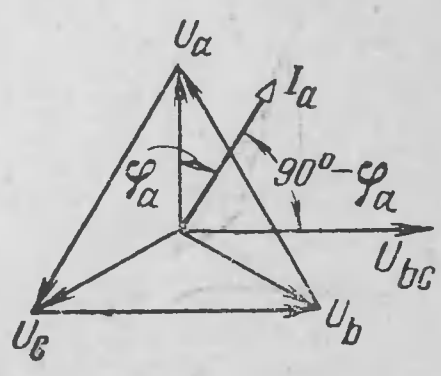


Рис. 20. Векторная диаграмма, иллюстрирующая измерение однофазным ваттметром реактивной мощности в трехфазной сети с равномерной нагрузкой фаз.

ложить к параллельной обмотке ваттметра не U, а U_1, то ваттметр покажет $IU\cos(90°-\varphi)=IU\sin\varphi$, т. е. реактивную мощность Q.

Рассмотрим несколько распространенных схем измерения реактивной мощности.

Измерение в трехфазной сети при равномерной нагрузке фаз и симметричных напряжениях.

1-й случай. Однофазный ваттметр включается так, что по его последовательной обмотке проходит ток I_a, опережающий напряжение U_{bc} (на которое присоединена параллельная обмотка) на угол $90°-\varphi_a$ (рис. 20). При таком включении ваттметр показывает:

$$I_a U_{bc}\cos(90°-\varphi)=I_a U_{bc}\sin\varphi=IU\sin\varphi^*.$$

Чтобы узнать, во сколько раз измеренная величина отличается от интересующей нас реактивной мощности трехфазной сети, нужно величину реактивной мощности $Q=\sqrt{3}IU\sin\varphi$ разделить на результат измерений $IU\sin\varphi$. Деление $\dfrac{\sqrt{3}IU\sin\varphi}{IU\sin\varphi}=\sqrt{3}$ показывает,

---

* Индексы, указывающие, в каких фазах производилось измерение тока и напряжения, опущены, так как согласно условию токи во всех фазах равны, а напряжения симметричны.

что для вычисления реактивной мощности трехфазного тока показания ваттметра нужно умножить на $\sqrt{3} = 1{,}73$.

Пример 30. Ваттметр показал 400 *вар**.

Реактивная мощность трехфазной сети $Q = \sqrt{3} \cdot 400 = 692$ *вар*.

2-й случай. Два однофазных ваттметра включаются по схеме рис. 15. Реактивная мощность трехфазной сети определяется умножением разности показаний ваттметров на $\sqrt{3} = 1{,}73$:

$$Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2).$$

Пример 31. Показания одного прибора 600 *вт*, другого 400 *вт*. Реактивная мощность трехфазной сети

$$Q = \sqrt{3}(600 - 400) = 346 \text{ вар}.$$

Измерение в трехфазной сети при неравномерной нагрузке фаз и симметричных напряжениях. Ваттметры включаются по схеме рис. 21, в которой нулевая точка образуется соединением в звезду трех равных по величине сопротивлений, из которых два являются сопротивлениями параллельных обмоток ваттметров, а третье — добавочное — сопротивление равно сопротивлению параллельной обмотки ваттметра. При составлении схемы необходимо точное соблюдение порядка чередования фаз [1].

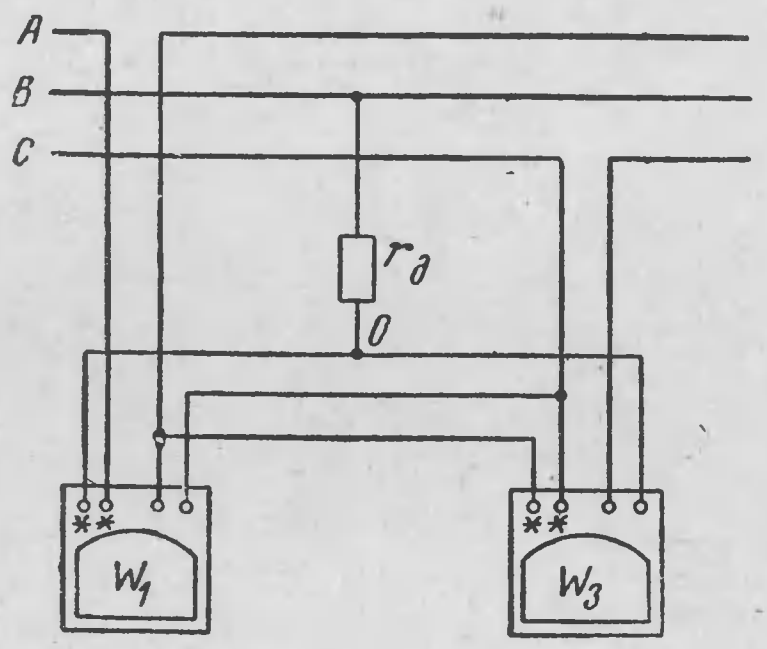


Рис. 21. Измерение реактивной мощности в трехфазной сети с искусственной нулевой точкой.

Реактивная мощность в трехфазной сети равна $\sqrt{3}(P_1 + P_2)$.

---

* Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (*вар*). Но, как показано здесь и ниже, величину реактивной мощности (равно как и величину реактивной энергии) часто определяют на основании показаний ваттметров (счетчиков) активной мощности (энергии). Их показания выражаются в ваттах, киловаттах, но результат вычислений получается в варах, киловарах, вар-секундах, киловар-часах и т. п., так как он определяет реактивную мощность (энергию).

[1] Направление вращения фаз определяется специальным прибором — фазоуказателем.

Пример 32. Показание одного ваттметра 600 *вт*, другого 400 *вт*. Реактивная мощность трехфазной сети $Q = \sqrt{3}(600 + 400) = 1\,743$ *вар*.

Измерения в трехфазной трехпроводной или четырехпроводной сети при равномерной или неравномерной нагрузке фаз.

Три однофазных ваттметра включаются по схеме рис. 22.

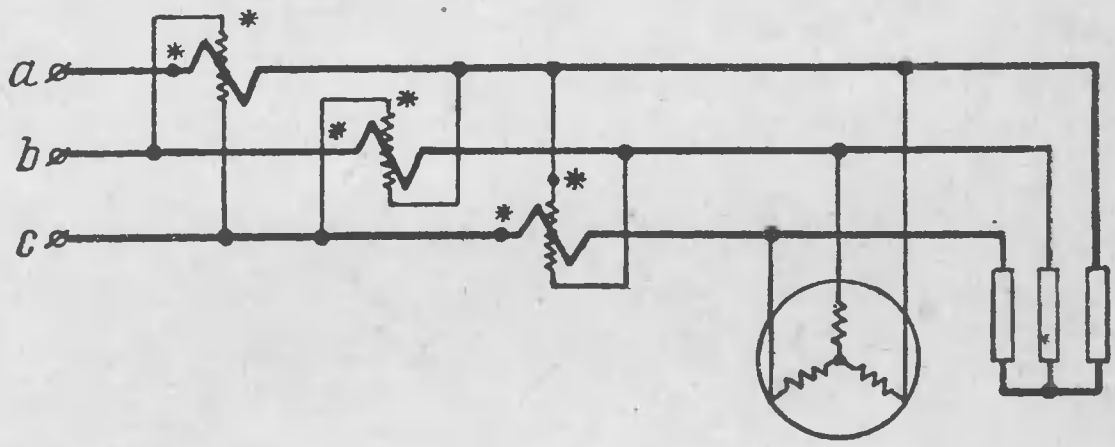


Рис. 22. Измерение реактивной мощности в трехпроводной сети трехфазного тока.

Параллельные обмотки однофазных ваттметров включаются так же, как и в схеме одного ваттметра (рис. 20), т. е. на соответственно свободные фазы. Реактивная мощность в трехфазной сети равна:

$$Q = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\sqrt{3}}.$$

Пример 33. Показания ваттметров 600, 400 и 500 *вт*. Мощность трехфазной сети $Q = \frac{600 + 400 + 500}{\sqrt{3}} = 867$ *вар*.

14. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ

Для измерения электрической энергии в сетях переменного тока применяются однофазные и трехфазные индукционные счетчики.

В счетчиках начала и концы обмоток обозначаются буквами *Г* и *Н*. В зажимы *Г* включаются провода, идущие со стороны питания (генератора); в зажимы *Н* — провода, идущие к нагрузке. Схема включения каждого счетчика всегда указывается на крышке, которой закрываются его зажимы.

В обозначениях типа счетчиков буквы и цифры имеют следующие значения:

С — счетчик.
А — активной энергии.
Р — реактивной энергии.
3 — для трехфазной сети.
4 — для четырехфазной сети.
У — универсальный; универсальные счетчики могут использоваться с любыми измерительными трансформаторами.

Пример 34. Сочетание букв и цифр, приведенных выше, обозначает:

СО — счетчик однофазный.
СА3— трехфазный, трехпроводный активной энергии.
СА4 — четырехпроводный счетчик активной энергии.
СР3 — трехфазный трехпроводный реактивной энергии.
СР4 — четырехпроводный счетчик реактивной энергии.

До введения ГОСТ 6570-53 счетчики выпускались также и с другими обозначениями типов. В ряде случаев в дальнейшем изложении указывается новое обозначение, а за ним, в скобках, старое. Например, СА3 (ИТ).

Включение однофазных счетчиков. Устройство однофазного счетчика типа СО описано в § 8. Однофазные счетчики включаются в однофазную сеть по схеме рис. 23. Если нагрузка присоединена между нулем и фазой, то токовая обмотка счетчика должна быть включена в фазу. Измерять активную или реактивную энергию трехфазной сети однофазными счетчиками в новых установках не разрешается.

Включение трехфазных счетчиков. При включении трехфазного счетчика нужно строго соблюдать порядок чередования фаз. Перед включением трехфазного счетчика в четырехпроводную сеть необходимо установить, какой из четырех подводимых проводов является нулевым.

Схема включения трехфазного счетчика активной энергии типа СА3 (ИТ) для трехпроводной сети показана на рис. 24. Счетчик имеет две токовые обмотки и две обмотки напряжения, т. е. представляет собой объединенные в одном корпусе два однофазных счетчика, которые включены по схеме Арона (см. § 12).

Схема включения трехфазных счетчиков реактивной энергии для трехпроводных сетей типа СР3 (ИТР) дана на рис. 25. В счетчиках типа СР3 три последовательные обмотки, причем одна из них разделена на две

равные части и расположена на разных магнитопроводах. Направление витков этой обмотки обратно направлению основных обмоток.

Для учета реактивной энергии в трехпроводных сетях трехфазного тока получили распространение счет-

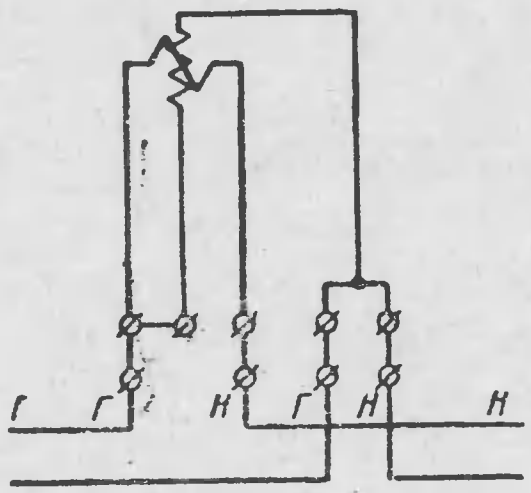


Рис. 23. Схема включения однофазного счетчика.

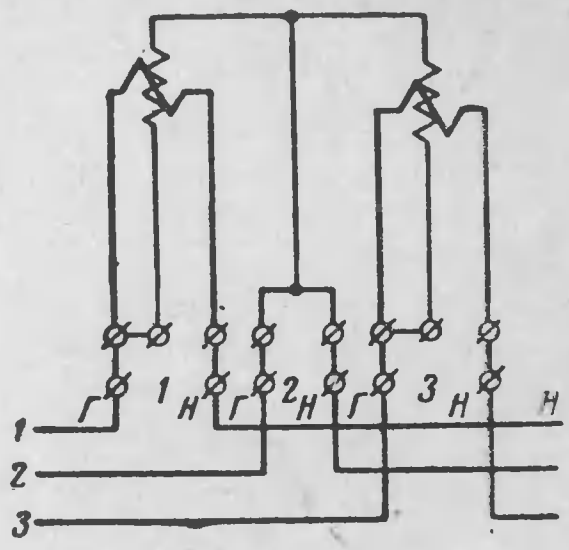


Рис. 24. Схема включения трехфазного счетчика типа САЗ (ИТ).

чики, в которых между магнитными потоками параллельный и последовательной цепей образован сдвиг 60° (рис. 26). Сдвиг получен в результате включения в цепи параллельных обмоток добавочных сопротивлений. Эти счетчики удобны в эксплуатации, так как схема их

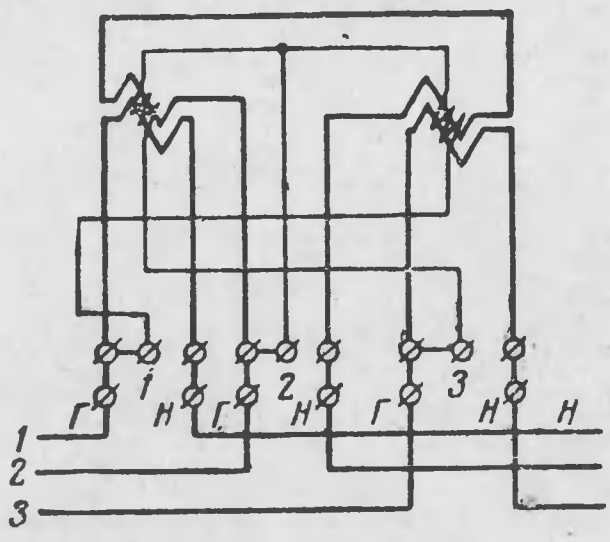


Рис. 25. Схема включения счетчика реактивной энергии типа СР3 (ИТР).

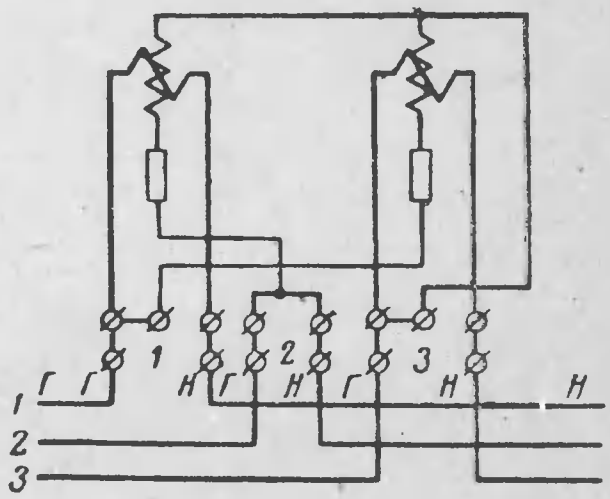


Рис. 26. Схема включения счетчика реактивной энергии с 60° сдвигом типа СР3.

включения ничем не отличается от схемы включения счетчиков активной энергии.

На рис. 27 дана схема совместного включения активного счетчика типа САЗ (ТЧ) для четырехпроводной сети и реактивного счетчика СР4. Последова-

тельные обмотки обоих счетчиков включены последовательно и получают питание от вторичных обмоток трансформаторов тока. Параллельные обмотки присоединяются непосредственно к сети, так как ее напряжение не выше номинального напряжения счетчика. Заземлять вторичные обмотки трансформаторов тока в данной схеме нельзя: заземление привело бы к короткому замыканию между фазами.

Включение счетчиков активной энергии типа СА3 и реактивной типа СР4 в сеть высокого напряжения пока-

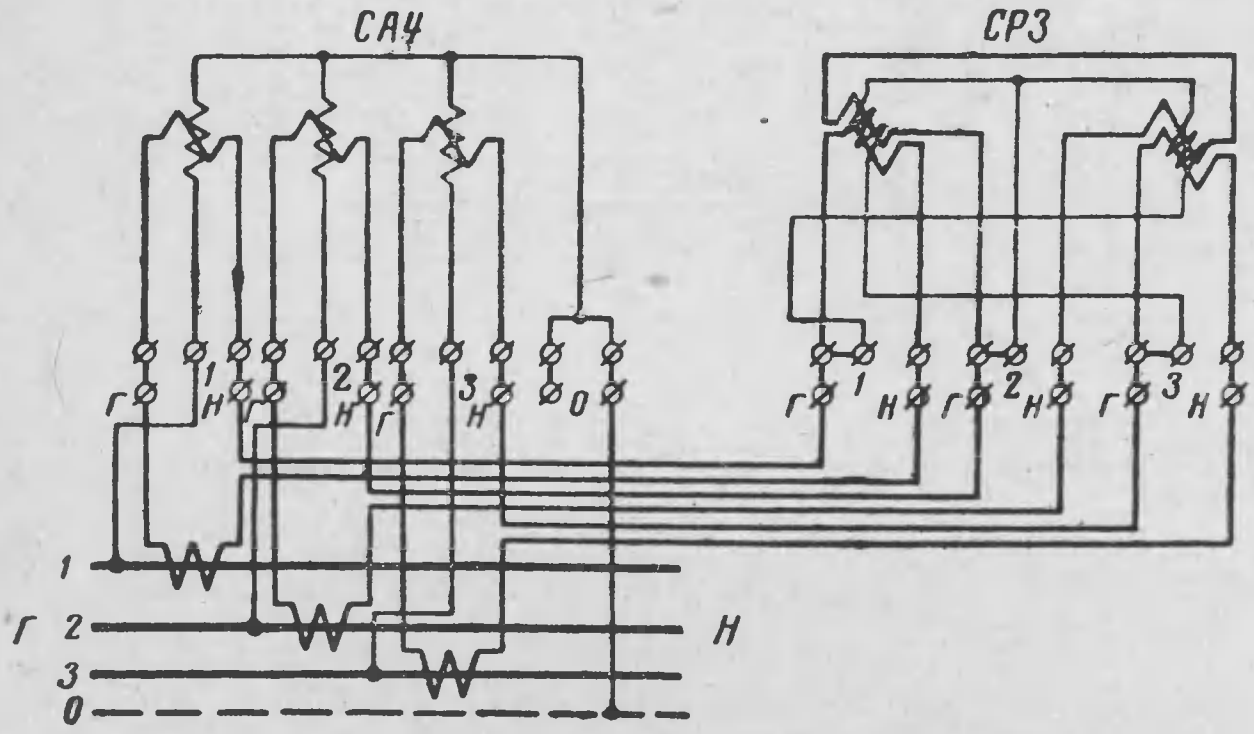


Рис. 27. Схема совместного включения счетчика типа СА4 (ТЧ) и счетчика типа СР3 (ИТР) через трансформаторы тока в сеть напряжением до 600 *в*.

зано на рис. 28. Измерительные трансформаторы в данном случае нужны не только для расширения пределов измерения, но и для изоляции счетчика от сети высокого напряжения. Заземление вторичных обмоток измерительных трансформаторов обязательно. В данном случае заземление не может привести к короткому замыканию в сети потому, что вторичные обмотки измерительных трансформаторов от сети изолированы.

При учете электроэнергии с применением измерительных трансформаторов могут быть следующие случаи:

1) Счетчик предназначен для работы с определенными трансформаторами тока и напряжения, и тогда счетчик показывает действительный расход электроэнергии.

2) Счетчик предназначен для работы без измерительных трансформаторов, а работает с измерительными

трансформаторами. Тогда для нахождения действительного расхода надо показания счетчика умножить на коэффициенты трансформации трансформаторов тока и напряжения.

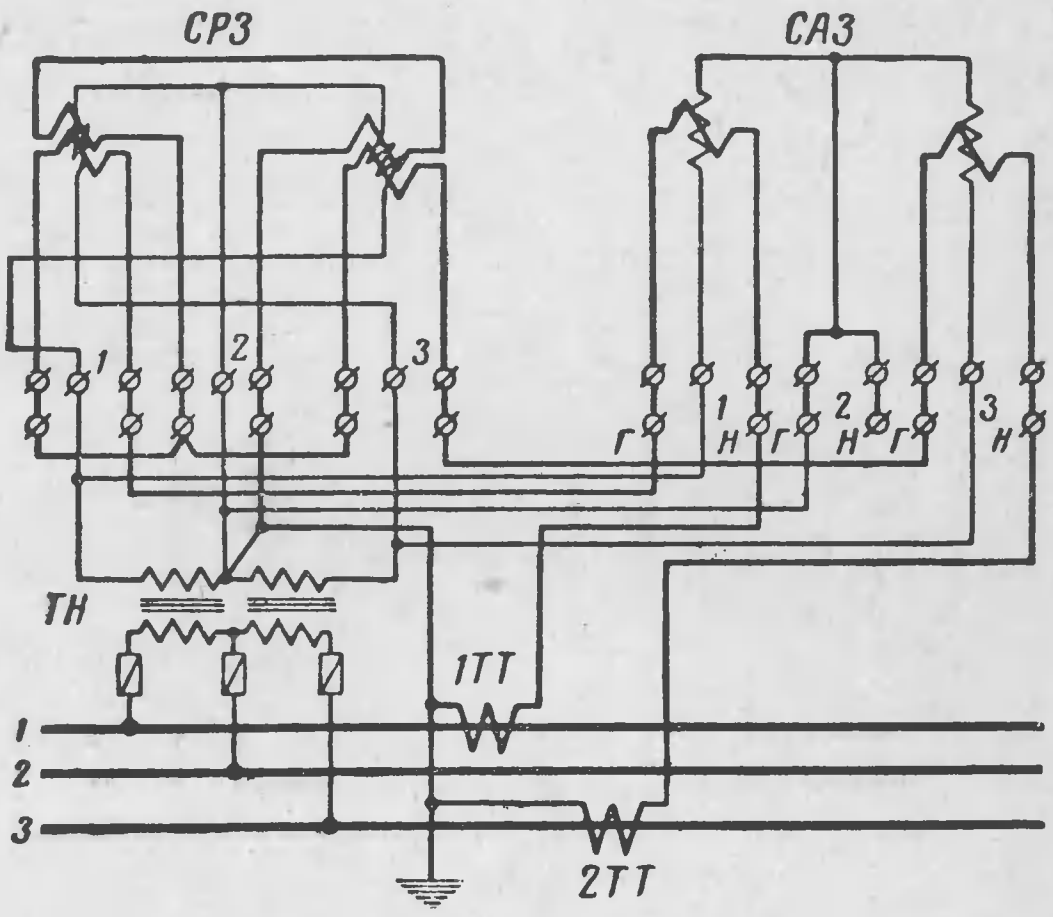


Рис. 28. Схема совместного включения счетчиков типа САЗ (ИТ) и СРЗ (ИТР) в сеть высокого напряжения

3) Счетчик предназначен для работы с определенными измерительными трансформаторами, а установлен в цепи с другими измерительными трансформаторами; тогда надо найти дополнительный коэффициент и показания счетчика умножить на этот коэффициент.

Пример 35. Трехфазный счетчик, предназначенный для работы с трансформатором напряжением 10 000/100 *в* и с трансформатором тока 200/5 *а*, включен с трансформатором напряжения 10 000/100 *в* и трансформатором тока 400/5 *а* и отсчитал 864,4 *квт·ч*.

k_1 — коэффициент трансформации трансформатора тока, установленного в сети $400/5 = 80$;

k_2 — коэффициент трансформации трансформатора напряжения $10\,000/100 = 100$;

k_3 — коэффициент трансформации трансформатора тока, указанный на счетчике $200/5 = 40$;

k_4 — коэффициент трансформации трансформатора напряжения, указанных на счетчике $10\,000/100 = 100$.

$$\frac{k_1}{k_3} \cdot \frac{k_2}{k_4} = \frac{80}{40} \cdot \frac{100}{100} = 2.$$

Значит, действительный расход электроэнергии определяется умножением показаний счетчика на 2 и составляет в данном примере $864{,}6 \cdot 2 = 1729{,}2$ *квт·ч*.

15. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Коэффициент мощности в цепи переменного тока можно определить косвенным методом (вычислить) на основании результатов измерения тока I, напряжения U и мощности P цепи по известному соотношению $\cos\varphi = \frac{P}{IU}$. Средний $\cos\varphi$ за определенный период может быть определен по показаниям активного или реактивного счетчиков или двух однофазных счетчиков.

Косвенные методы измерения дают небольшую точность и требуют затраты времени. Поэтому удобнее пользоваться специальными приборами — фазометрами. Измерительный механизм фазометра представляет собой электродинамический логометр, включенный по соответствующей схеме (рис. 29). Логометры не имеют спиральных пружин для создания противодействующего момента, а ток к обмоткам подвижных катушек подводится при помощи безмоментной токоподводки.

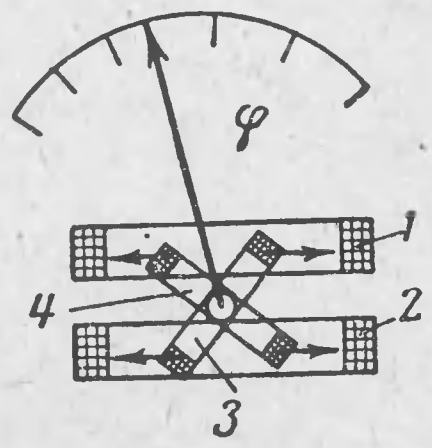


Рис. 29. Принципиальная схема устройства электродинамического логометра.

Показания фазометра определяются не абсолютными значениями токов, проходящих по его катушкам, а их отношением, и при определенной схеме включения прибора можно добиться зависимости его показаний от угла φ сдвига фаз между током нагрузки I и приложенным к ней напряжением U.

На рис. 29 приведена принципиальная схема устройства электродинамического фазометра. Прибор имеет две неподвижные катушки *1* и *2*, две подвижные катушки *3* и *4* на общей оси. При прохождении тока I по неподвижным катушкам и токов I_1 и I_2 по подвижным катушкам образуются два вращающих момента, которые направлены в разные стороны. Разность моментов определяет поворот стрелки на некоторый угол, соответствующий положению равновесия. Угол поворота ло-

гометра в электродинамическом фазометре зависит от угла сдвига фаз φ, поэтому шкала фазометра градуируется в значениях угла φ или его косинуса.

16. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ

Частотомер включается в сеть как вольтметр, и на его шкале всегда указывается то напряжение, на которое он рассчитан. Применявшиеся ранее вибрационные частотомеры сняты с производства и заменены стрелочными ферродинамическими или малогабаритными электромагнитными частотомерами.

На рис. 30 показана принципиальная схема соединения катушек ферродинамического стрелочного частотомера. Катушки *1* и *2* соединены последовательно с безындуктивным сопротивлением *r* и образуют одну параллельную цепь. Другие катушки *3* и *4* соединены последовательно с конденсатором *C* и индуктивной катушкой *L* и образуют вторую параллельную ветвь. При включении частотомера в сеть в параллельных ветвях прибора проходят токи I_1 и I_2, обратно пропорциональные сопротивлениям параллельных ветвей.

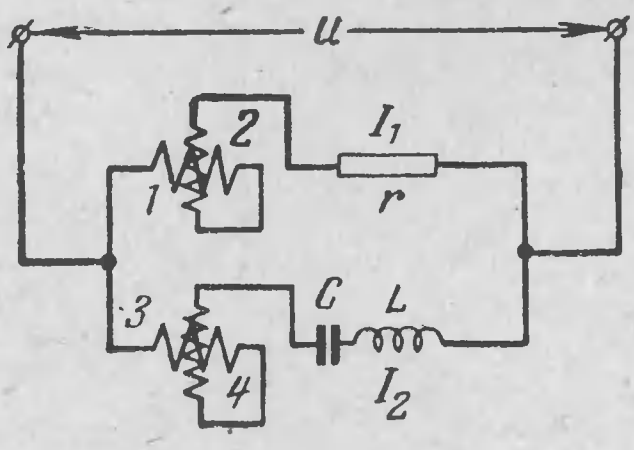


Рис. 30. Схема ферродинамического частотомера.

Под действием образующихся вращающих моментов стрелка частотомера отклоняется, причем угол ее поворота определяется величиной частоты *f*.

Зависимость угла поворота от частоты объясняется тем, что из двух токов, создающих взаимодействующие моменты, ток I_1 от частоты не зависит (цепь безреактивная), другой ток I_2 зависит от частоты, так как цепь содержит емкость и индуктивность.

17. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА

Для того, чтобы измерительные приборы работали нормально и их погрешности не выходили за пределы допустимых, необходим надзор за приборами. Для организации надзора на всех электростанциях, промышлен-

ных предприятиях и транспорте с крупным электрохозяйством организуются заводские (ведомственные) электроизмерительные лаборатории. Мелкие коммунально-бытовые установки обслуживаются объединенными электролабораториями.

Все электроизмерительные приборы (амперметры, вольтметры, ваттметры, счетчики и др.) должны подвергаться обязательной государственной поверке. Сроки государственной поверки установлены правилами Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров Союза ССР.

Образцовые амперметры, вольтметры и ваттметры классов 0,5; 0,2; 0,1, шунты и добавочные сопротивления к образцовым приборам поверяются 1 раз в год. Эти же приборы более низких классов точности поверяются в сроки, установленные предприятием и утвержденные местным отделением Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров Союза ССР.

Счетчики электрической энергии поверяются: однофазные бытовые — 1 раз в 5 лет, остальные (однофазные и трехфазные) 1 раз в 2 года.

Измерительные трансформаторы тока и напряжения класса 0,2 поверяются 1 раз в 5 лет. Измерительные трансформаторы тока и напряжения класса 0,5 и ниже поверяются при выпуске с производства и при ремонте.

Кроме обязательной государственной поверки, все электроизмерительные приборы периодически поверяются в сроки, установленные самим предприятием. Эти сроки не подлежат согласованию с отделением Комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

При всех работах, связанных с производством электрических измерений, снятием на ремонт и установкой новых электроизмерительных приборов, в электроустановках всех напряжений должны соблюдаться правила безопасности.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Наименование	Типы распространенных электроизмерительных приборов					
	Магнитоэлектрические		Электромагнитные		Электродинамические и ферродинамические	
	Лабораторные и технические	Щитовые	Лабораторные и технические	Щитовые	Лабораторные и технические	Щитовые
Амперметр	М55, М65, МА-11, М104	А-46, А-500, М4, М210, М213, М415, М730	АСТ, Э-51, Э53, ЭП2	Э12, Э16, Э30, Э421	Д57, ЭЛА	—
Ваттметр однофазный	—	—	—	—	АСТД, ЭДВ	ЭТВ
Ваттметр трехфазный	—	—	—	—	Д50	Д310, Д341, Д341/1, Д343
Вольтметр	В-1500, М55, М65, М106, М451	В-46, М63, М210, М213, М415, М730	АВН, АМВ, АСТВ	ВП-46, ЭВ-46, Э110	Д51, ЭЛВ	—
Вольтамперметр	М80, МВА-47	—	—	—	—	—
Вольтмиллиамперметр	М193	ВА-46	—	—	—	—
Микроамперметр	ЛМ, М91, М95, МА-750	М-24, ВИВ, М49, М494, М592, ПМС	—	—	—	—
Миллиамперметр	ЛМ-1, М45	ВИЭ, М4, М5, М61, М340 ПМ-70	АСТ	Э421	ЭЛМА	—
Милливольтметр	ЛМ, ЛМ-1, М105, М150	—	—	—	—	—
Частотомер	—	—	—	—	Д506	Д210, Д340
Фазометр	—	—	—	—	ЭЛФ, ЭЛФ-1, ЭЛФ-2	ЭТФ, Д320 Д342

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов М. Ф., Пигин С. М. и Червякова В И., Сборка и регулировка электроизмерительных приборов, Госэнергоиздат, 1955.

2. Востроκнутов Н. Г., Электрические счетчики и их эксплуатация, Госэнергоиздат, 1959.

3. Константинов Б. А., Соколова К. И. и Шулятьева Г. Н., Коэффициент мощности и способы его улучшения на промышленных предприятиях, Госэнергоиздат, 1959.

4. Минин Г. П., Измерение мощности, Госэнергоиздат, 1962.

5. Попов В. С., Электротехнические измерения и приборы, Госэнергоиздат, 1956.

6. Федотов Б. Н., Схемы электрических счетчиков, Госэнергоиздат, 1960.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Назначение электрических измерений 3
2. Приборы, применяющиеся при электрических измерениях . 4
3. Маркировка приборов 7
4. Оценка точности электроизмерительных приборов . . . 9
5. Магнитоэлектрические и выпрямительные приборы . . . 16
6. Электромагнитные приборы 20
7. Электродинамические и ферродинамические приборы . . . 23
8. Индукционные приборы и счетчики 25
9. Техника электрических измерений 28
10. Измерение тока 30
11. Измерение напряжения 35
12. Измерение активной мощности 39
13. Измерение реактивной мощности 45
14. Измерение активной и реактивной энергии 48
15. Измерение коэффициента мощности 53
16. Измерение частоты 54
17. Организация электроизмерительного хозяйства 54
Приложение 56
Литература . . . . .

Архив

Цена 11 коп.

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Вышли из печати

Иевлев В. И. и Скляров П. В., **Из опыта монтажа силовых трансформаторов напряжением 110—220 кв (Вып. 58)**

Фридкин И. А., **Прокладка кабельных линий в земле (Вып. 59)**

Гомберг А. Е., **Измеритель заземления (Вып. 60)**

Демчев В. И. и Царьков В. М., **Прожекторное освещение (Вып. 61)**

Минин Г. П., **Измерение мощности (Вып. 62)**

Каетанович М. М., **Как работают провода, изоляторы и арматура линий электропередачи (Вып. 63)**

Злобин Б. В., **Испытания силовых трансформаторов при монтаже (Вып. 64)**

Рубо Л. Г., **Изоляционные лаки и их применение (Вып. 65)**

Мусаэлян Э. С., **Проверки и испытания при монтаже турбогенераторов (Вып. 66)**

Карпов Ф. Ф. и Козлов В. Н., **Простейшие схемы автоматизации (Вып. 67)**

Волоцкой Н. В., **Люминесцентные лампы и схемы их включения в сеть (Вып. 68)**

Гринберг Г. С. и Дейч Р. С., **Применение электромонтажных изделий (Вып. 69)**

Минскер Э. И. и Соколов Н. Г., **Электрические проводки металлорежущих станков (Вып. 70)**

Андриевский В. Н., **Эксплуатация деревянных опор линий электропередачи (Вып. 71)**

Дормакович П. А., Михалков А. В., Петров А. В., **Изготовление и обслуживание газосветных установок (Вып. 72)**

Готовятся к печати

Белоцерковец В. В., **Применение строительно-монтажного пистолета СМП-1**

Гумин М. И., **Схемы управления коммутационными электроаппаратами и их наладка**

Зимин Е. Н., **Защита асинхронных электродвигателей**

Колузаев А. М., **Ремонт и обслуживание быстродействующих выключателей ВАБ-2**

Стешенко Н. Н., **Монтаж плоских проводов**

Хромченко Г. Е., **Соединение и оконцевание медных и алюминиевых проводов и кабелей**

Госэнергоиздат заказов на книги не принимает и книг не высылает. Книги, выходящие массовым тиражом, высылают наложенным платежом без задатка отделения «Книга — почтой». Отделения «Книга — почтой» имеются во всех республиканских, краевых и областных центрах СССР.

Заказ следует адресовать так: название республиканского, краевого или областного центра, книготорга, отделению «Книга—почтой».