

**Храмшин Т.Р.,
Храмшин Р.Р.,
Корнилов Г.П.,
Николаев А.А.**

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

Магнитогорск 2011

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова»

Т.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

Утверждено редакционно-издательским советом факультета
в качестве учебного пособия

Магнитогорск 2011

УДК 621.317 (075)
ББК 31.221

Рецензенты:

*Заведующий кафедрой прикладной информатики и управляющих систем
автоматики Новотроицкого филиала Московского института стали
и сплавов, кандидат технических наук, доцент*

С.Н. Басков

*Начальник центральной электротехнической лаборатории
ОАО «ММК», кандидат технических наук*

В.В. Головин

Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П., Николаев А.А.

Приборы и методы измерения электрических величин: учеб.
пособие. 1-е изд. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. – 95 с.: ил.

ISBN 000-0-0000-0000-0

В учебном пособии изложены основные методы и средства измерений электрических величин, рассмотрены вопросы применения аналоговых и цифровых приборов при проведении электрических измерений.

Предназначено для занятий по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация» для студентов специальностей 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов», 140211 «Электроснабжение», 210106 «Промышленная электроника».

УДК 621.317 (075)

ISBN 000-0-0000-0000-0

© ГОУ ВПО «МГТУ», 2011

© Храмшин Т.Р.,
Храмшин Р.Р.,
Корнилов Г.П.,
Николаев А.А., 2011

ВВЕДЕНИЕ

Электрические измерения занимают особое место в измерительной технике. Современная электроэнергетика, электромеханика и электроника опираются на измерение электрических величин. В настоящее время разработаны и выпускаются приборы, с помощью которых могут быть проведены измерения более пятидесяти параметров электрических цепей, таких как: сила тока, напряжение, мощность, частота, электрическая энергия, индуктивность, емкость и т.д.

Методы и средства измерения электрических величин определяются родом тока и напряжения, используемых в электрических цепях. В цепях переменного тока они зависят от частоты и характера изменения величин, а также от того, какие характеристики измеряются (мгновенные, действующие, максимальные, средние). В цепях постоянного тока наиболее широко применяют магнитоэлектрические приборы и цифровые измерительные устройства. Для измерений в цепях переменного тока находят применение электромагнитные, электродинамические, индукционные, электростатические, выпрямительные приборы, осциллографы, а также цифровые измерительные приборы. Некоторые из перечисленных приборов являются универсальными и используются для измерений как в цепях переменного, так и постоянного тока.

Диапазоны измеряемых значений электрических величин имеют непрерывную тенденцию к расширению. Измерения малых токов и больших сопротивлений, высоких напряжений и электрических параметров мощных энергетических установок требуют применения специфических методов и средств электрических измерений, а именно – использование электрических преобразователей (измерительные шунты, добавочные сопротивления, трансформаторы тока и напряжения и т.д.). К специфическим проблемам измерений сверхмалых и сверхбольших значений электрических параметров относятся борьба с искажениями, сопровождающими процессы усиления и ослабления сигналов, и разработка методов выделения полезного сигнала на фоне помех.

Современное развитие электрических измерений характеризуется использованием новых физических эффектов (например, эффект Холла) для создания более чувствительных и высокоточных средств измерения, внедрением в технику достижений электроники, сопряжением их с вычислительной техникой и автоматизацией процессов измерения.

В учебном пособии подробно рассмотрены основные измерительные системы, применяемые в электротехнике. Также приведены основные сведения о масштабных преобразователях электрических величин. Рассмотрены основные методы измерения электрических величин в цепях постоянного и переменного тока. Освещены способы измерения параметров электрических цепей: сопротивлений, индуктивностей и емкостей. Даны основные сведения об устройствах и принципах работы цифровых измерительных приборов и электронных осциллографов.

1. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

1.1. Общие сведения

Измерительный механизм можно рассматривать как преобразователь электрической энергии в механическую. Электрическая энергия поступает из измеряемой цепи, а под действием полученной механической энергии осуществляется перемещение подвижной части механизма относительно неподвижной.

В большинстве механизмов подвижная часть имеет возможность поворачиваться вокруг оси на угол α , значительно реже подвижная часть совершает линейное перемещение.

Момент, возникающий в приборе под действием измеряемой величины и поворачивающий подвижную часть в сторону возрастающих показаний, называется *вращающим моментом* M . Он однозначно определяется измеряемой величиной x и в общем случае может зависеть также от угла поворота α подвижной части. В идеальном случае вращающий момент прямо пропорционален измеряемой величине.

Если бы повороту подвижной части ничего не препятствовало, то при любом значении измеряемой величины, отличном от нуля, она повернулась бы до упора. Для того чтобы угол отклонения α зависел от измеряемой величины, в приборе при повороте подвижной части создается *противодействующий момент* M_α , направленный навстречу вращающему и зависящий от угла поворота. Как правило, противодействующий момент создается с помощью пружины.

Установившееся положение указателя наступает, когда вращающий момент полностью уравновешивается противодействующим моментом

$$M = M_\alpha.$$

В зависимости от физических явлений, положенных в основу создания вращающего момента, или, другими словами, от способа преобразования электромагнитной энергии в механическую энергию перемещения подвижной части электромеханические приборы делятся на следующие основные системы: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, ферродинамические, электростатические, индукционные.

1.2. Магнитоэлектрические механизмы

Работа механизмов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии магнитного потока постоянного магнита и тока, проходящего по катушке (рамке). Возникающий при этом вращающий момент отклоняет подвижную часть механизма относительно неподвижной.

Магнитная цепь измерительного механизма (рис. 1.1, а) состоит из сильного постоянного магнита 1, полюсных наконечников 5 и цилиндри-

ческого сердечника 7. Благодаря специальной форме полюсных наконечников в воздушном зазоре между ними и сердечником создается сильное, практически равномерное радиальное магнитное поле.

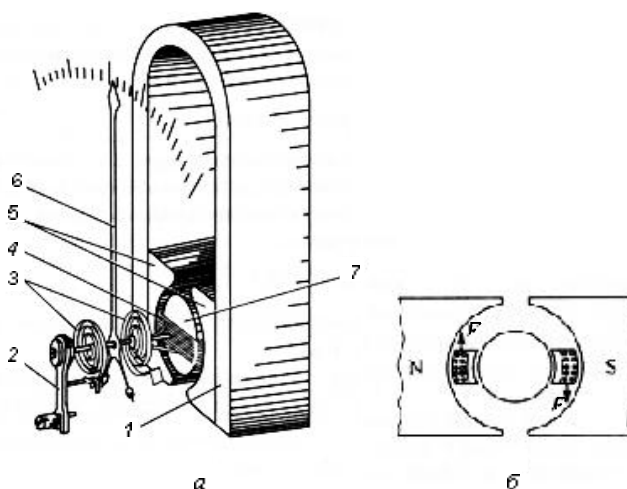


Рис. 1.1. Магнитоэлектрический механизм

Подвижная часть механизма представляет собой катушку (рамку) 4 прямоугольной формы из тонкого медного или алюминиевого провода, намотанного на алюминиевый каркас (либо без каркаса), которая может поворачиваться вокруг сердечника в магнитном поле. К рамке с двух сторон приклеиваются алюминиевые буксы для закрепления растяжек или кернов. Стрелка 6 и циферблат со шкалой образуют отсчетное устройство.

Измеряемый ток I подводится к обмотке рамки через две спиральные пружины 3, которые выполняют двойную функцию: создают противодействующий момент M_α и выполняют роль токоподводов. Одна из спиральных пружин прикреплена к корректирующему устройству 2. Противодействующий момент пропорционален углу закручивания пружин α , т. е. $M_\alpha = k\alpha$, где k – коэффициент, определяющий жесткость пружины.

При протекании по обмотке рамки постоянного тока I на рамку действует пара сил $F - F$ (рис. 1.1, б), создающая вращающий момент M

$$M = Blbw \cdot I,$$

где B – магнитная индукция в воздушном зазоре; l – длина активной стороны витка; b – средняя ширина обмотки рамки; w – число витков рамки.

Установившееся отклонение подвижной части определяется равенством вращающего и противодействующего моментов, откуда вытекает уравнение преобразования

$$\alpha = \frac{B l b w}{k} \cdot I \quad \text{или} \quad \alpha = S \cdot I ,$$

где S – чувствительность механизма по току.

Из последнего уравнения следует, что отклонение стрелки прибора прямо пропорционально току, т.е. шкала прибора *равномерная*.

Успокоение в магнитоэлектрических механизмах магнитоиндукционное, но без применения специальных успокоителей. Момент успокаивающий подвижную часть с каркасной рамкой определяется взаимодействием магнитного потока с вихревыми токами, возникающими в алюминиевом каркасе при движении подвижной части в поле постоянного магнита.

Магнитоэлектрические механизмы, применяемые в амперметрах и вольтметрах, обладают сравнительно большим моментом инерции подвижной части и могут применяться только для измерений на постоянном токе. При пропускании по рамке переменного тока, среднее значение которого за период равно нулю, поворота подвижной части не произойдет, так как среднее за период значение вращающего момента также равно нулю. Если помимо переменного тока в сигнале имеется постоянная составляющая, то подвижная часть повернется на угол, обусловленный этой составляющей.

Магнитоэлектрические приборы относятся к числу наиболее точных. Они изготавливаются вплоть до класса точности 0,1. Высокая точность этих приборов объясняется рядом причин. Наличие равномерной шкалы уменьшает погрешности градуировки и отсчета. Благодаря сильному собственному магнитному полю влияние посторонних полей на показания приборов весьма незначительно. Внешние электрические поля на работу приборов практически не влияют. Температурные погрешности могут быть скомпенсированы с помощью специальных схем.

Большим достоинством магнитоэлектрических приборов является высокая чувствительность. В этом отношении магнитоэлектрические приборы не имеют себе равных. Известны магнитоэлектрические микроамперметры с током полного отклонения 0,1 мкА (например, типа М95, класса точности 1,0).

К недостаткам магнитоэлектрических приборов следует отнести несколько более сложную и дорогую конструкцию, чем, например, конструкция электромагнитных приборов, невысокую перегрузочную способность (при перегрузке обычно перегорают токоподводящие пружинки для создания противодействующего момента) и, самое главное, область применения этих приборов (при отсутствии выпрямителей) ограничивается лишь измерениями на постоянном токе. Однако, если включать эти

приборы через выпрямитель, то их можно использовать при измерении и на переменном токе.

Магнитоэлектрические приборы находят широкое применение в качестве амперметров и вольтметров постоянного тока с пределами измерений от наноампер до килоампер и от долей милливольт до киловольт, в сочетании с различного рода преобразователями переменного тока в постоянный они используются для измерений в цепях переменного тока.

Рассмотрим особенности устройства измерительных механизмов магнитоэлектрических логометров.

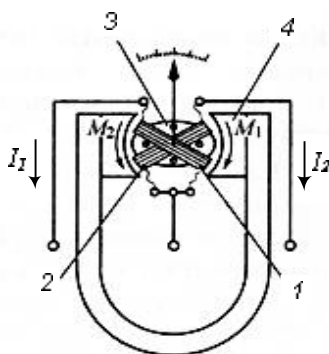


Рис. 1.2. Магнитоэлектрический логометрический механизм: 1 – вращающаяся рамка; 2 – противодействующая рамка; 3 – сердечник; 4 – полюсной наконечник

Хотя бы один из моментов должен зависеть от угла поворота. Значит, один (или несколько) из параметров, определяющих значение момента, должен являться функцией угла α . Технически наиболее просто сделать зависящей от угла поворота индукцию B . Для этого магнитное поле в зазоре должно быть неравномерным, что достигается неравномерностью зазора (с этой целью сердечник 3 на рис. 1.2 сделан эллипсоидальным).

Индукция в местах расположения активных сторон рамок соответственно равна: $B_1 = f_1(\alpha)$ и $B_2 = f_2(\alpha)$, тогда моменты, действующие на подвижную часть, можно выразить следующим образом:

$$M_1 = I_1 F_1(\alpha); \quad M_2 = I_2 F_2(\alpha).$$

Подвижная часть занимает положение установившегося отклонения, соответствующее условию равенства моментов $M_1 = M_2$ или $I_1 F_1(\alpha) = I_2 F_2(\alpha)$, откуда

$$I_1 / I_2 = F_2(\alpha) / F_1(\alpha) = F_3(\alpha) \quad \text{или} \quad \alpha = F(I_1 / I_2).$$

В логометрах противодействующий момент создается не механическим путем, а электрическим. Для этого в магнитоэлектрическом логометре (рис. 1.2) подвижная часть выполняется в виде двух жестко скрепленных между собой рамок 1 и 2, по обмоткам которых протекают токи I_1 и I_2 . Пружинки для создания механического противодействующего момента не ставятся, а ток к обмоткам подводится с помощью безмоментных токоподводов, выполняемых в виде тонких неупругих металлических ленточек.

Направления токов в обмотках выбираются так, чтобы моменты M_1 и M_2 , создаваемые рамками, действовали навстречу друг другу. Один из моментов вращающий, а второй – противодействующий.

Таким образом, логометр измеряет отношение токов, протекающих в обмотках рамок.

1.3. Амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы

Для использования измерительных механизмов магнитоэлектрической системы в качестве амперметров и вольтметров могут потребоваться шунты и добавочные резисторы.

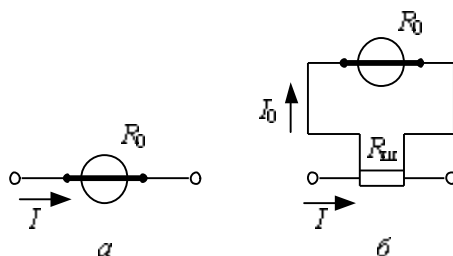


Рис. 1.3. Схемы магнитоэлектрических амперметров: а — на малые токи; б — на большие токи

Изменение температуры окружающей среды, так как при любом сопротивлении обмотки прибор измерит тот ток, который протекает по ней.

В приборах на большие токи используются шунты (рис. 1.3, б). У приборов с шунтом при изменении температуры окружающей среды происходит перераспределение токов в параллельных ветвях, появляется температурная погрешность. Медь, как и все чистые металлы, имеет положительный *температурный коэффициент сопротивления* (ТКС), то есть с повышением температуры электрическое сопротивление медного проводника увеличивается. Простейшим способом уменьшения влияния температуры является включение последовательно с обмоткой рамки добавочного резистора R_1 из манганина (рис. 1.4), при этом уменьшается температурный коэффициент цепи рамки, так как в диапазоне температур 0...200 °С манганин имеет отрицательный ТКС.

Для построения вольтметра на базе магнитоэлектрического механизма измеряемое напряжение должно быть преобразовано в пропорциональный ему ток. Для этого последовательно с измерительным механизмом включают добавочный резистор R_d (рис. 1.5).

Значение сопротивления для измерения напряжения U определяется по формуле

$$I_0 = U_0 / (R_0 + R_d),$$

где I_0 — ток полного отклонения; R_0 — сопротивление механизма.

В простейшем приборе для измерения тока, построенном на магнитоэлектрическом механизме, весь измеряемый ток протекает по обмотке рамки с сопротивлением R_0 (рис. 1.3, а). По такой схеме выполняют приборы для измерения малых токов — микроамперметры и миллиамперметры (с верхним пределом измерения 30...50 мА). На показаниях этих приборов не сказывается изменение

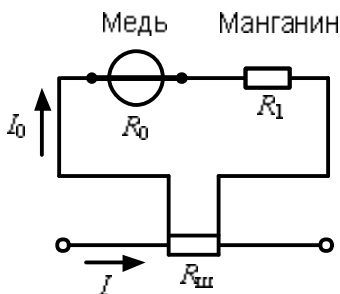


Рис. 1.4. Схема уменьшения температурной погрешности

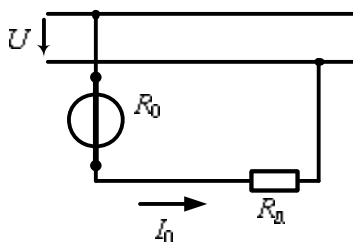


Рис. 1.5. Схема магнито-электрического вольтметра

Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры являются наиболее точными, обладают высокой чувствительностью, малым собственным потреблением мощности, имеют равномерную шкалу. На них слабо влияют внешние магнитные поля.

Недостатки этих приборов – пригодность только для работы на постоянном токе, чувствительность к перегрузкам, сравнительно высокая стоимость.

Отечественная промышленность выпускает магнитоэлектрические амперметры и вольтметры щитовые и переносные, однопредельные и многопредельные всех классов точности от 0,1.

1.4. Электродинамические и ферродинамические механизмы

Работа измерительных механизмов *электродинамической системы* (рис. 1.6) основана на взаимодействии магнитных полей двух катушек с токами – неподвижной и подвижной.

Подвижная катушка 1 измерительного механизма электродинамической системы, укрепленная на оси 3, может поворачиваться внутри неподвижной. При протекании в обмотках катушек токов i_1 и i_2 возникают электромагнитные силы, стремящиеся так повернуть подвижную часть, чтобы магнитные потоки B_1 и B_2 подвижной и неподвижной катушек совпали.

Неподвижная катушка 2 обычно выполняется из двух одинаковых частей (секций), разделенных воздушным зазором. Благодаря этому обеспечиваются требуемая конфигурация магнитного поля и удобство расположения оси, которая проходит между секциями. Неподвижная и подвижная катушки механизма (обычно бескаркасные) имеют круглую или прямоугольную форму и изготавливаются из медного или алюминиевого провода. Подвижная катушка укрепляется на опорах, а подвод тока к проводникам этой катушки обеспечивают спиральные пружины.

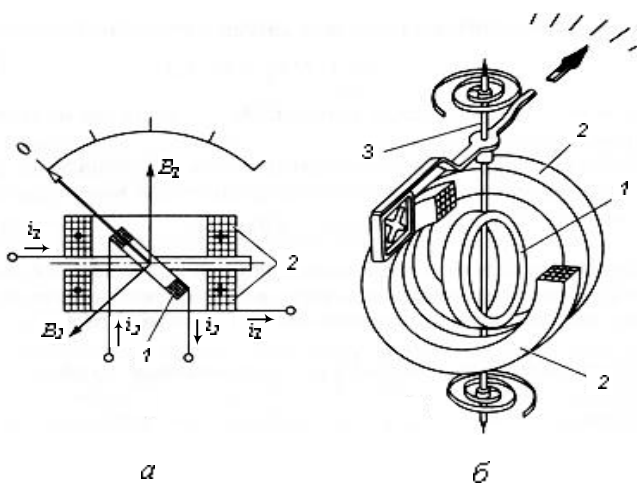


Рис. 1.6. Электродинамический измерительный механизм: *а* – устройство; *б* – внешний вид. 1 – подвижная катушка; 2 – неподвижная катушка; 3 – ось

Собственное магнитное поле электродинамических механизмов, силовые линии которого замыкаются по воздуху, невелико. Поэтому на эти механизмы оказывают влияние внешние магнитные поля. Для защиты от них применяется экранирование, т. е. измерительный механизм помещают внутри одного или двух экранов из ферромагнитного материала. Успокоение – воздушное или магнитоиндукционное.

При протекании по катушкам переменных токов подвижная часть из-за механической инерционности будет реагировать на среднее значение вращающего момента, и если противодействующий момент создается пружиной, то угол отклонения стрелки прибора будет выражаться следующим образом:

$$\alpha = S(\alpha) I_1 I_2 \cos \psi ,$$

где I_1 и I_2 - действующие значения токов, ψ – угол сдвига между синусоидами токов, $S(\alpha)$ – чувствительность прибора (зависит от угла поворота подвижной рамки).

Таким образом, вращающий момент пропорционален произведению действующих значений токов в катушках и косинусу угла сдвига фаз между ними. Следовательно, электродинамический механизм обладает фазочувствительными свойствами и может быть использован не только для измерения тока и напряжения, но и мощности.

При протекании по катушкам постоянных токов I_1 и I_2 уравнение преобразования можно представить следующим выражением:

$$\alpha = S(\alpha) I_1 I_2 .$$

Основными достоинствами электродинамических механизмов являются: одинаковые показания на постоянном и переменном токе (при последовательном соединении катушек), что позволяет с большой точностью градуировать их на постоянном токе, а также стабильность показаний во времени.

Недостатками электродинамических механизмов являются невысокая чувствительность, большое собственное потребление мощности, чувствительность к перегрузкам.

Указанные свойства электродинамических механизмов позволяют на их основе выпускать лабораторные многопредельные приборы высоких классов точности (0,5; 0,2; 0,1) для измерений на постоянном и переменном токе. Выпускаются миллиамперметры и амперметры с пределами от 1 мА до 10 А на частоты до 10 кГц, многопредельные вольтметры с пределами от 1,5 до 600 В на частоты до 5 кГц с током полного отклонения от 60 до 3 мА, многопредельные однофазные ваттметры с пределами по току от 25 мА до 10 А и по напряжению от 15 до 600 В.

Механизмы *ферродинамической системы* отличаются от рассмотренных электродинамических механизмов тем, что неподвижная катушка имеет магнитопровод из магнитомягкого листового материала.

На рис. 1.7 изображена конструкция ферродинамического механизма. Благодаря наличию магнитопровода магнитный поток и, следовательно, вращающий момент существенно возрастают, поэтому *магнитодвижущая сила* (МДС) катушки может быть снижена и, следовательно, уменьшено собственное потребление мощности механизма.

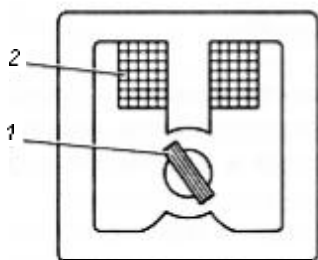


Рис. 1.7. Конструкция ферродинамического механизма

Подвижная катушка в ферродинамических механизмах выполняется на каркасе из диэлектрика либо бескаркасной во избежание появления в каркасе индуцированных токов. Противодействующий момент создается пружинами. Неподвижная катушка 2 (см. рис. 1.7) в ферродинамическом механизме располагается на магнитопроводе, а подвижная катушка 1, укрепленная на оси, перемещается в воздушном зазоре с равномерным и радиальным магнитным полем.

Собственное магнитное поле в ферродинамических механизмах сильное, поэтому внешние магнитные поля на них влияют слабо. Конструкция механизма, изображенная на рис. 1.7 особенно хорошо защищена, так как магнитопровод одновременно является экраном. Для успокоения в большинстве случаев применяются магнитоиндукционные успокоители.

Наличие магнитопровода обуславливает появление погрешности из-за нелинейности магнитных свойств материала сердечника и вихревых токов, поэтому ферродинамические приборы обладают большей основной погрешностью, чем электродинамические.

Достоинствами ферродинамических приборов являются: меньшая, чем у электродинамических, восприимчивость к внешним магнитным полям, меньшее собственное потребление мощности, больший вращающий момент. Однако точность и частотный диапазон у них ниже, чем у электродинамических.

Указанные свойства ферродинамических приборов определяют область их применения – в качестве щитовых и переносных приборов переменного тока, а также в качестве самопишущих приборов.

Отечественная промышленность выпускает тряско-, вибро- и ударопрочные щитовые ферродинамические амперметры и вольтметры классов точности 1,5 и 2,5, переносные амперметры и вольтметры класса 0,5, щитовые и переносные ваттметры классов точности 0,2 и 0,5. Применяются они преимущественно на переменном токе промышленной частоты.

1.5. Амперметры и вольтметры электродинамической и ферродинамической систем

Наиболее простая измерительная цепь у измерителя тока – миллиамперметра электродинамической системы, изображенного на рис. 1.8, а. Весь измеряемый ток проходит через неподвижную 1 и подвижную 2 катушки, соединенные последовательно.

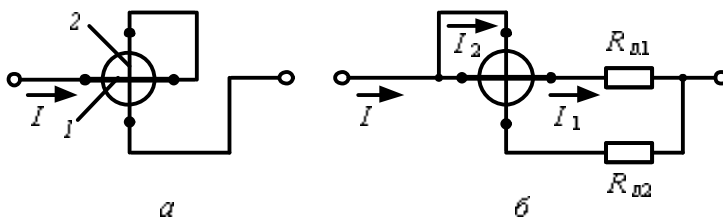


Рис. 1.8. Принципиальные схемы электродинамических амперметров

У амперметров на токи от 0,5 А и выше катушки соединяются параллельно (рис. 1.8, б). Сопротивления параллельных цепей подобраны так, чтобы ток I_2 не превышал допустимого значения.

Для создания двухпредельного амперметра неподвижная катушка делается из двух одинаковых секций, переключение которых с последовательного соединения на параллельное, позволяет изменять пределы измерения с соотношением токов 1 : 4.

У электродинамических вольтметров неподвижная и подвижная катушки соединены последовательно вместе с добавочным резистором (рис. 1.9). Секционированием добавочного резистора можно получить разные пределы измерения.

Для получения шкалы близкой к равномерной у амперметров и вольтметров размеры подвижной катушки выбирают так, чтобы подвижная катушка находилась в практически однородном магнитном поле. В результате удастся в амперметрах и вольтметрах электродинамической системы получить приблизительно равномерную шкалу, за исключением ее начальной части.

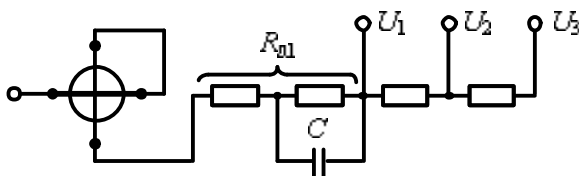


Рис. 1.9. Схема электродинамического вольтметра

На показания электродинамических амперметров и вольтметров оказывают влияние внешние магнитные поля, температура окружающей среды и частота тока.

В амперметрах с последовательным соединением катушек изменения их сопротивления при изменении температуры не влияют на показания, но имеющая при этом место некоторая температурная погрешность обусловлена изменением упругих свойств спиральных пружин.

В амперметрах, имеющих параллельно соединенные катушки, из-за неодинакового изменения сопротивлений ветвей может возникнуть температурная погрешность за счет перераспределения токов I_1 и I_2 в параллельных ветвях. Для компенсации температурной погрешности путем подбора добавочных резисторов из манганина и меди делают равными температурные коэффициенты параллельных ветвей.

На показания амперметров с последовательной схемой соединения катушек влияние частоты невелико, и проявляется оно, начиная с сотен герц.

В амперметрах с параллельным соединением катушек из-за разного соотношения активных и реактивных сопротивлений ветвей и влияния взаимной индуктивности между катушками появляется частотная погрешность. Для уменьшения частотной погрешности с помощью $R_{д1}$ и $R_{д2}$ (рис. 1.8, б) делают одинаковыми постоянные времени параллельных цепей, т. е. $L_1/R_1 = L_2/R_2$, где L_1 и L_2 – индуктивности, а R_1 и R_2 – активные составляющие полных сопротивлений параллельных цепей.

В вольтметрах электродинамической системы температурная погрешность обусловлена изменением сопротивлений катушек и упругости пружин. Поэтому температурная погрешность, обусловленная изменением сопротивлений катушек, тем меньше, чем больше сопротивление добавочного резистора из манганина по сравнению с сопротивлением катушек.

Изменение частоты вызывает изменение реактивной составляющей полного сопротивления цепи вольтметра и создает частотную погрешность. Для компенсации этой погрешности часть добавочного сопротивления шунтируется конденсатором с емкостью C (рис. 1.9).

В ферродинамических приборах температурная погрешность обусловлена теми же причинами, что и в электродинамических, а также изменениями потерь в магнитопроводе.

Влияние изменения частоты на ферродинамические приборы больше, чем на электродинамические, из-за большей индуктивности катушек. Компенсация частотной погрешности осуществляется подключением конденсатора, как и в схеме на рис. 1.9.

1.6. Ваттметры электродинамической и ферродинамической систем

Для измерения мощности постоянного и переменного тока на практике широко применяются электродинамические и ферродинамические ваттметры. Вращающий момент, вызывающий отклонение подвижной части прибора и соединенной с ней стрелки (указателя), при постоянном токе пропорционален произведению силы тока на напряжение, а при переменном токе – также косинусу угла сдвига фаз между током и напряжением.

При измерении мощности постоянного тока неподвижная катушка (обе секции) включается последовательно с нагрузкой (рис. 1.10, *а*), и по ней проходит ток нагрузки I . Поэтому она называется последовательной цепью ваттметра.

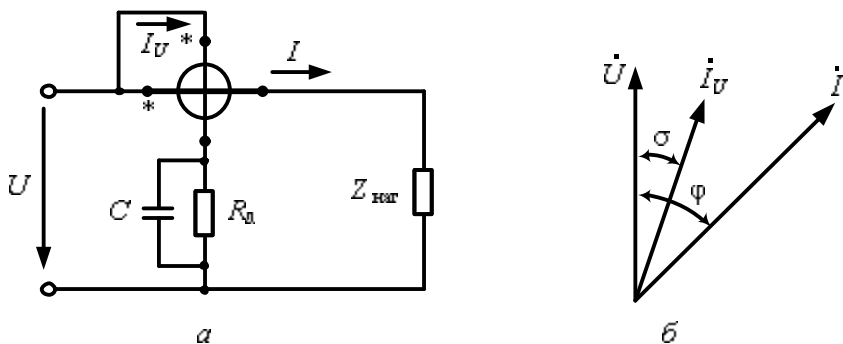


Рис. 1.10. Электродинамический ваттметр: *а* — схема измерительной цепи; *б* — векторная диаграмма

К подвижной катушке, соединенной последовательно с добавочным резистором R_d , подводится напряжение U , и по ней проходит ток $I_U = U/R_U$, где R_U – полное сопротивление параллельной цепи.

Для ваттметра, включенного в цепь постоянного тока, уравнение преобразования имеет вид:

$$\alpha = S(\alpha) I_1 I_2 = S(\alpha) \frac{U}{R_U} I = S'(\alpha) \cdot P.$$

При условии, что чувствительность прибора – величина постоянная $S'(\alpha) = \text{const}$ шкала ваттметра будет равномерной.

В электродинамическом ваттметре равномерность рабочего участка шкалы обеспечивается путем выбора определенных соотношений размеров катушек и их начального взаимного расположения.

При включении ваттметра в цепь переменного тока с напряжением $u = U_m \sin \omega t$ и током нагрузки $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ ток в параллельной цепи равен:

$$i_U = U_m \sin(\omega t - \delta) / Z_U,$$

где Z_U – полное сопротивление параллельной цепи; δ – угол отставания по фазе тока I_U от напряжения U из-за наличия индуктивности в параллельной цепи (рис. 1.10, б).

В этом случае, принимая во внимание зависимость угла отклонения стрелки от действующих значений протекающих токов и косинуса угла между ними, получим

$$\begin{aligned} \alpha &= S(\alpha) I_1 I_2 \cos \psi = S(\alpha) \frac{U}{Z_U} I \cos(\varphi - \delta) = \\ &= S'(\alpha) U I \cos \delta \cos(\varphi - \delta), \end{aligned}$$

где $Z_U = R_U / \cos \delta$.

Таким образом, отклонение α будет пропорционально активной мощности при условии, что $\delta = 0$ ($Z_U = R_U$). Следовательно, ток в параллельной цепи должен совпадать по фазе с напряжением (параллельная цепь должна иметь активное сопротивление), тогда

$$\alpha = S'(\alpha) U I \cos \varphi = S'(\alpha) \cdot P.$$

Угол δ можно сделать малым лишь в некоторой области частот, шунтируя добавочный резистор R_d (или его часть) в параллельной цепи ваттметра (см. рис. 1.10, а) конденсатором C .

Выполнение условия $Z_U = R_U$ позволяет производить поверку и градуировку ваттметра с высокой точностью на постоянном токе.

Дополнительные погрешности у электродинамических ваттметров могут быть вызваны влиянием температуры, частоты переменного тока, внешних магнитных полей.

Влияние температуры сказывается на изменении параметров цепи подвижной катушки и упругости пружин и аналогично влиянию температуры на вольтметры электродинамической системы.

Изменение частоты приводит к изменению полного сопротивления цепи подвижной катушки и, следовательно, к изменению значения тока I_U . Кроме того, появляется угловая (фазовая) погрешность. Ток I_U отстает по фазе от напряжения U , что вызывает ощутимую погрешность ваттметра. Для уменьшения угловой погрешности применяют частотную компенсацию.

Для защиты от влияний внешних магнитных полей электродинамические ваттметры экранируют.

В ваттметрах направление отклонения указателя зависит полярности тока или напряжения. При одновременном изменении полярности тока и напряжения знак вращающего момента и направление отклонения указателя не изменяются, а при изменении только полярности тока (или напряжения) указатель отклоняется в другую сторону. Поэтому зажимы последовательной и параллельной цепей ваттметра имеют разметку. Зажимы, обозначенные звездочкой (*), называются генераторными и должны включаться в линию со стороны источника электроэнергии.

Электродинамические ваттметры обычно выполняются многопредельными как по току, так и по напряжению. Для реализации переключения пределов измерения неподвижная катушка состоит из секций, соединяемых последовательно или параллельно, а в цепи подвижной катушки добавочный резистор выполняется секционированным так, чтобы получать несколько номинальных напряжений.

Градуируются ваттметры в делениях так, что при номинальных токе $I_{\text{ном}}$, напряжении $U_{\text{ном}}$ и $\cos\varphi = 1$ стрелка отклоняется на полное число делений шкалы n_{max} (100 или 150 дел.). Для определения измеренного значения мощности отсчитанное число делений надо умножить на цену деления $C_{\text{ном}}$, которая для каждого предела измерения рассчитывается по формуле

$$C_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} / n_{\text{max}}.$$

Для измерений в цепях с малыми значениями $\cos\varphi$ применяют специальные малокосинусные ваттметры, у которых отклонение стрелки на всю шкалу имеет место при номинальном напряжении и токе и $\cos\varphi = 0,1$ или $\cos\varphi = 0,2$. Номинальное значение $\cos\varphi$ обозначено на шкале.

Ферродинамический однофазный ваттметр включается в цепь аналогично электродинамическому ваттметру (рис. 1.10).

Ферродинамический ваттметр по сравнению с электродинамическим имеет больший магнитный поток и, следовательно, мало восприимчив к

внешним магнитным полям, имеет меньшее собственное потребление мощности и большую чувствительность, более устойчив к механическим воздействиям, но ему присущи специфические погрешности от влияния вихревых токов и нелинейности кривой намагничивания. Эти погрешности снижают точность ферродинамических ваттметров, поэтому они выпускаются в качестве щитовых приборов классов точности не лучше 1,5. Трехфазные ферродинамические ваттметры активной и реактивной мощности бывают двухэлементные и трехэлементные. Первые применяются для измерения мощности в трехфазных трехпроводных цепях, а вторые – в трехфазных четырехпроводных цепях. Они состоят из двух или трех однофазных элементов, имеющих общую ось с укрепленными на ней подвижными катушками. Вращающий момент такого прибора равен алгебраической сумме вращающих моментов отдельных элементов.

1.7. Механизмы электромагнитной системы

Работа электромагнитных измерительных механизмов основана на взаимодействии магнитного поля, созданного неподвижной катушкой, по обмотке которой протекает измеряемый ток, с одним или несколькими ферромагнитными сердечниками, эксцентрично укрепленными на оси. Наибольшее распространение получили измерительные механизмы с плоской катушкой, с круглой катушкой и с замкнутым магнитопроводом (рис. 1.11).

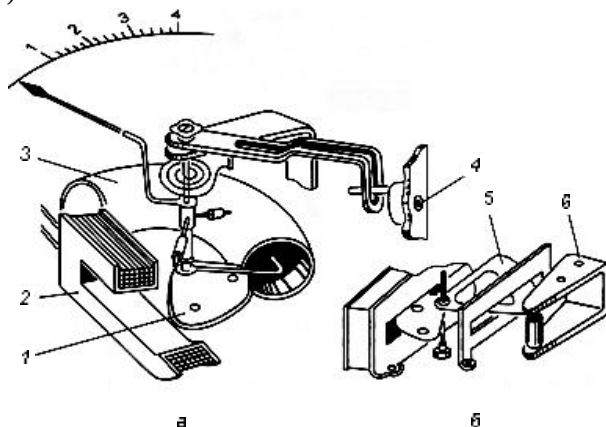


Рис. 1.11. Электромагнитный механизм с плоской катушкой:

1 – подвижный сердечник; 2 – катушка; 3 – воздушный успокоитель; 4 – корректор нуля; 5, 6 – магнитоиндукционный успокоитель

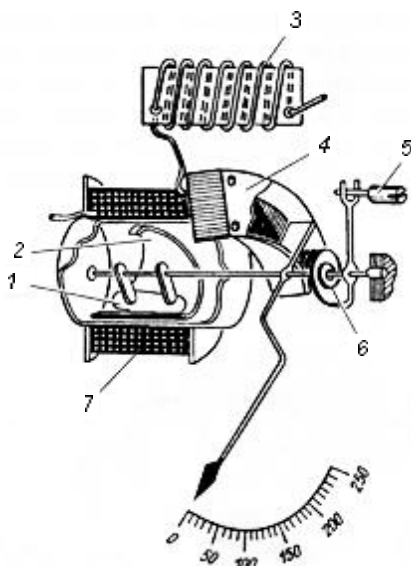
Измерительный механизм с плоской катушкой (рис. 1.11) состоит из катушки 2 с обмоткой из медного провода и сердечника 1. Сердечник из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью и

малой коэрцитивной силой укрепляется на оси с опорами. Противодействующий момент создается спиральной пружиной. Успокоение воздушное (рис. 1.11, а) или магнитоиндукционное (рис. 1.11, б).

В механизмах с круглой катушкой (рис. 1.12) подвижный сердечник 1, укрепленный на оси, и неподвижный 2 располагаются внутри катушки. При протекании тока в обмотке катушки оба сердечника намагничиваются одноименно и отталкиваются друг от друга. Поэтому подвижный сердечник вместе с осью и другими деталями, укрепленными на ней, поворачивается на некоторый угол.

Механизмы с замкнутым магнитопроводом (рис. 1.13) меньше подвержены влиянию внешних магнитных полей на подвижный сердечник, более чувствительны к протекающему через катушку току, но более трудоемки в производстве.

Катушка 1 расположена на неподвижном магнитопроводе 5 с двумя парами полюсных наконечников 3 и 4. Магнитопровод и полюсные наконечники выполнены из магнитомягкого материала. Подвижный сердечник 2 из магнитомягкой стали или пермаллоя, укрепленный на растяжках, может перемещаться в зазоре между полюсными наконечниками.



При протекании тока через катушку возникает магнитное поле, которое, воздействуя на подвижный сердечник 2, стремится расположить его так, чтобы энергия поля была наибольшей. Энергия магнитного поля электромагнитного механизма, имеющего катушку с током I , равна $W_M = 1/2 I^2 L$, где L — индуктивность катушки, вращающий момент равен производной от энергии по углу поворота подвижной части

$$M = \frac{dW_M}{d\alpha} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2.$$

При протекании в обмотке катушки переменного тока подвижная часть из-за

Рис. 1.12. Электромагнитный механизм с круглой катушкой: 1 — подвижный сердечник; 2 — неподвижный сердечник; 3 — добавочный резистор; 4 — успокоитель; 5 — корректор нуля; 6 — спиральная пружина; 7 — катушка

своей инерционности будет реагировать на среднее значение вращающего момента, поэтому выражение для угла отклонения подвижной части будет иметь вид

$$\alpha = S(\alpha) \cdot I^2,$$

откуда следует, что шкала у электромагнитного измерительного прибора неравномерная. Для уменьшения неравномерности шкалы форму сердечника подбирают так, чтобы шкала была практически равномерна, начиная с 15...20 % верхнего предела.

При работе механизма электромагнитной системы на переменном токе в окружающих металлических частях и сердечнике возникают вихревые токи, размагничивающие сердечник. Из-за этого показания на переменном токе немного меньше, чем на постоянном. Указанное различие в показаниях увеличивается с ростом частоты, но на частоте 50 Гц оно невелико.

Магнитное поле в электромагнитных механизмах без магнитопроводов, замыкающееся в основном по воздуху, невелико, поэтому внешние магнитные поля существенно влияют на показания приборов с такими механизмами. Для уменьшения влияния внешних магнитных полей применяют экранирование. В механизмах с магнитопроводом собственное магнитное поле значительно сильнее, чем внешнее, поэтому экра-

нировать приборы с такими механизмами не нужно.

Недостатки электромагнитных механизмов – неравномерная шкала с нерабочим начальным участком, влияние внешних магнитных полей на механизмы без магнитопровода и большое собственное потребление мощности.

Достоинства электромагнитных механизмов – способность работать на постоянном и переменном токе, устойчивость к токовым перегрузкам, простота конструкции (самые простые среди измерительных приборов разных групп).

Благодаря отмеченным достоинствам электромаг-

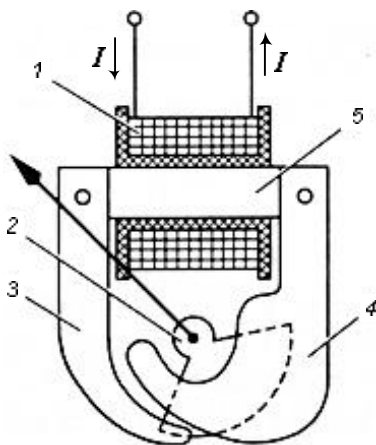


Рис. 1.13. Электромагнитный механизм с замкнутым магнитопроводом: 1 – катушка; 2 – подвижный сердечник; 3 и 4 – полюсные наконечники; 5 – неподвижный магнитопровод

нитные механизмы используются в технических щитовых амперметрах и вольтметрах класса точности 1,0 и более низких классов для измерений в цепях переменного тока. Кроме того, они применяются в переносных многопредельных приборах класса точности 0,5.

Электромагнитные амперметры и вольтметры. В амперметрах электромагнитной системы весь измеряемый ток проходит по катушке измерительного механизма. Значение номинальной магнитодвижущей силы, определяемой произведением тока на число витков, необходимой для создания магнитного поля в зазоре катушки, составляет: 100 А·витков в механизмах, подвижная часть которых крепится на опорах; 50 А·витков в механизмах с подвижной частью, укрепленной на растяжках; 20 А·витков в механизмах с замкнутым магнитопроводом. Поэтому для расширения диапазонов измерения электромагнитных однопредельных амперметров одного типа необходимо уменьшить число витков катушки. В амперметре на номинальный ток 100 А катушка имеет один виток, выполненный из толстой медной шины. Такие амперметры для прямого включения на токи больше 200 А не изготовляют из-за нагрева шины и сильного влияния на показания прибора магнитного поля токоподводящих проводов. Диапазоны измерения электромагнитных амперметров, работающих на переменном токе, проще расширять с помощью измерительных трансформаторов тока.

Электромагнитные щитовые амперметры обычно выпускаются однопредельными, а переносные – многопредельными (до четырех пределов измерения).

Для расширения диапазонов измерения переносных многопредельных электромагнитных амперметров катушки выполняют секционированными. Секции включаются в последовательно-параллельные комбинации.

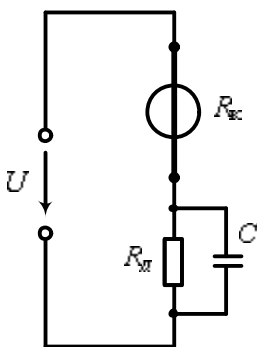


Рис. 1.14. Схема электромагнитного вольтметра

Температурная погрешность у электромагнитных амперметров невелика и обусловлена только изменением упругости спиральной пружины или растяжек. Изменение сопротивления обмотки катушки из-за влияния внешней температуры не вызывает погрешности, так как весь измеряемый ток проходит по обмотке.

Дополнительная частотная погрешность в электромагнитных амперметрах из-за вихревых токов в сердечнике и поверхностного эффекта в проводах обмотки также невелика.

В **вольтметрах** электромагнитной системы последовательно с катушкой измерительного механизма включается добавочный безреактивный резистор $R_{д}$, выполненный из манганина (рис. 1.14).

Добавочные резисторы могут быть внутренними и наружными. В многопредельных вольтметрах добавочные резисторы делают секционированными. Для компенсации температурной погрешности у вольтметров необходимо, чтобы отношение сопротивления добавочного резистора из манганина к сопротивлению катушки из меди было достаточно велико (не меньше значения, обеспечивающего класс точности прибора). Обычно у вольтметров на напряжение большее 100 В это условие соблюдается, и их диапазоны измерения расширяются за счет изменения сопротивлений добавочных резисторов при неизменном токе полного отклонения.

Имеются конструкции вольтметров с замкнутым магнитопроводом, у которых катушка намотана манганиновым проводом, а добавочный резистор отсутствует. Показания таких вольтметров мало зависят от температуры.

Изменение частоты сказывается на показаниях вольтметров больше, чем на показаниях амперметров, так как катушки вольтметров имеют значительно большее количество витков и, следовательно, индуктивность. С повышением частоты тока увеличивается реактивная составляющая сопротивления катушки вольтметра, вызывающая уменьшение тока в цепи прибора, и показания его уменьшаются. Поэтому для расширения частотного диапазона необходимо вводить частотную компенсацию с помощью включения конденсатора с емкостью C параллельно части добавочного резистора, как и в электродинамическом вольтметре (см. рис. 1.9).

Электромагнитные вольтметры и амперметры обладают следующими достоинствами: они пригодны для работы на постоянном и переменном токе, устойчивы к токовым перегрузкам, имеют простую конструкцию.

Их недостатками являются некоторая неравномерность шкалы, зависимость показаний от внешних магнитных полей, большое собственное потребление мощности (за исключением приборов с замкнутым магнитопроводом).

Отечественная промышленность выпускает: переносные амперметры класса точности 0,5 с верхними пределами измерений от 10 мА до 10 А на частоты до 1500 Гц; щитовые однопредельные амперметры классов точности 1,0; 1,5; 2,5 на токи до 300 А со встроенными трансформаторами тока и до 15 кА с наружными трансформаторами тока; переносные вольтметры класса точности 0,5 с верхними пределами измерений от 1,5 до 600 В; щитовые вольтметры классов точности 1,0; 1,5; 2,5 с верхними пределами измерений от 0,5 до 600 В непосредственного включения и до 450 кВ с трансформаторами напряжения на различные фиксированные частоты от 50 до 1000 Гц.

Контрольные вопросы

1. Что такое измерительный механизм?
2. Какие условные обозначения наносят на электроизмерительные приборы?
3. Что означает класс точности электроизмерительного прибора?
4. Как включаются в электрическую цепь приборы для измерения напряжения, тока, мощности?
5. Почему амперметр должен иметь малое внутреннее сопротивление, а вольтметр – большое сопротивление?
6. Расскажите про устройство, принцип работы и область применения приборов с магнитоэлектрическим измерительным механизмом. Назовите его достоинства и недостатки.
7. В чем состоит особенность магнитоэлектрических логометров?
8. Почему приборы с магнитоэлектрическим механизмом не могут использоваться в цепях переменного тока?
9. Расскажите про устройство, принцип работы и область применения приборов с электромагнитным измерительным механизмом. Назовите его достоинства и недостатки.
10. Расскажите про устройство, принцип работы и области применения приборов с электродинамическим и ферродинамическим измерительными механизмами. Назовите достоинства и недостатки этих систем.
11. Приведите принципиальные схемы электродинамических вольтметров и амперметров.
12. Как включают катушки электродинамического прибора при измерении мощности?
13. Чем обусловлена температурная погрешность вольтметров и амперметров, построенных на базе электродинамического измерительного механизма?
14. Дайте определение угловой погрешности ваттметра переменного тока. Назовите способы ее устранения.
15. Какое влияние оказывает увеличение частоты на погрешность измерения тока и напряжения при использовании приборов с электромагнитным измерительным механизмом?

2. МАСШТАБНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Масштабным называют измерительный преобразователь, предназначенный для изменения значения измеряемой величины в заданное число раз.

К масштабным измерительным преобразователям относятся: шунты, добавочные резисторы, измерительные трансформаторы тока и напряжения, измерительные усилители.

2.1. Шунты и добавочные резисторы

Непосредственное включение магнитоэлектрического механизма в измерительную цепь позволяет измерять постоянные токи не превышающие 20 – 50 мА. Превышение указанных значений может привести к повреждениям провода рамки и спиральной пружины. Таким образом, сам магнитоэлектрический механизм может выступать только в роли микроамперметра или миллиамперметра.

Измерение больших токов производят с помощью измерительных цепей, включающих в себя *шунты*. Шунт является простейшим измерительным преобразователем тока в напряжение. Он представляет собой четырехзажимный резистор. Два входных зажима, к которым подводится ток I , называются токовыми, а два выходных зажима, с которых снимается напряжение U , называются потенциальными. К потенциальным зажимам обычно присоединяют измерительный механизм *ИМ* прибора.

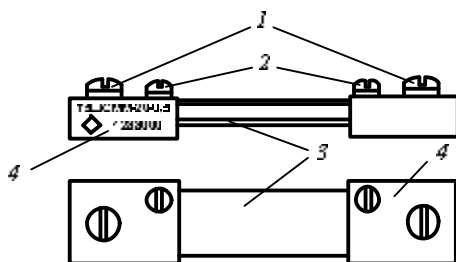


Рис. 2.1. Наружный шунт: 1 – токовые зажимы, 2 – потенциальные зажимы, 3 – манганиновые пластины, 4 – медные наконечники

На рис. 2.1 показан шунт на 20 А. Он имеет массивные наконечники из меди 4, которые служат для отвода тепла от манганиновых пластин 3, впаянных между ними. Внешние зажимы шунта 1 – токовые. С помощью них шунт включают в силовую цепь, где необходимо померить ток. Измерительный механизм посредством калиброванных проводов присоединяют к потенциальным зажимам 2, между которыми

и заключено сопротивление шунта. При таком включении измерительно-го механизма устраняются погрешности от контактных сопротивлений.

Шунт включается в силовую цепь последовательно, а измерительный механизм - параллельно шунту (рис. 2.2). Благодаря малому сопро-

тивлению шунта $R_{ш}$ (сотые и тысячные доли Ома) большая часть тока измеряемого тока протекает по нему, и небольшая часть – по измерительному механизму.

Коэффициент шунтирования $n = I/I_{и}$ показывает отношение измеряемого тока I к току измерительного механизма $I_{и}$.

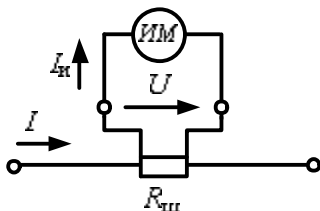


Рис. 2.2. Схема включения измерительного механизма с шунтом

Шунты изготавливают из манганина, сплава с высоким удельным сопротивлением и малой зависимостью его от температуры. Если шунт рассчитан на небольшой ток, то его обычно встраивают в корпус прибора (внутренние шунты). Для измерения больших токов используют приборы с наружными шунтами. В этом случае мощность, рассеиваемая в шунте, не нагревает прибор.

Шунт характеризуется номинальным значением входного тока $I_{ном}$ и номинальным значением выходного напряжения $U_{ном}$. Номинальные напряжения наружных шунтов калибруются. По ГОСТ 8042-93 калиброванные шунты должны иметь номинальное падение напряжения 10, 15, 30, 50, 60, 75, 100, 150 и 300 мВ. Наиболее часто используемое значение номинального напряжения шунта составляет 75 мВ.

Выбор шунта производится по двум параметрам – номинальным току и напряжению. Номинальное напряжение шунта должно быть равно номинальному напряжению измерительного механизма, а ток, на который выбирают шунт, определяется током нагрузки с учетом ее перегрузочной способности.

Шунты разделяются на классы точности 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5. Число, определяющее класс точности, обозначает допустимое отклонение сопротивления шунта в процентах его номинального значения. Серийные шунты выпускаются для токов не более 5000 А. Для измерения токов свыше 5000 А допустимо параллельное соединение шунтов.

Основной областью применения шунтов является их использование в цепях постоянного тока с магнитоэлектрическими измерительными механизмами. Применение шунтов с измерительными механизмами других систем нерационально из-за сравнительного большого потребления мощности этими механизмами, и как следствие к существенному увеличению размеров шунтов и увеличению потребляемой мощности.

Часто требуется измерить ток, величина которого больше чем предел измерения амперметра. Задача решается путем включения в силовую цепь наружного шунта и подключения к его потенциальным зажимам

амперметра (рис. 2.3, а). Измерительная цепь самого амперметра в свою очередь состоит из параллельно соединения внутреннего шунта и магнитоэлектрического измерительного механизма (рис. 2.3, б). Номинальное напряжение наружного шунта следует выбрать равным номинальному напряжению измерительного механизма. Возникает вопрос: на какой ток выбрать наружный шунт?

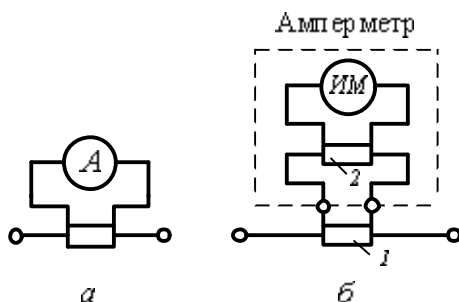


Рис. 2.3. Схема включения амперметра с шунтом: 1 – шунт наружный, 2 – шунт внутренний

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

Например, имеется амперметр с током полного отклонения 2 А, необходимо им измерять ток, значение которого примерно 14 А. На первый взгляд удобно коэффициент шунтирования принять равным 7 ($n=14/2$), а шунт выбрать на $14 - 2 = 12$ А. Но тогда

при определении численного значения измеряемого тока показание амперметра следовало бы всякий раз умножать на 7, что не совсем удобно. Поэтому коэффициент шунтирования лучше взять равным 10, выбрав шунт с номинальным током $20 - 2 = 18$ А. В последнем случае верхний предел измерений амперметра будет уже 20 А, а измеряемому току 14 А будет соответствовать показание на шкале прибора 1,4 А.

Вопросы для самоконтроля:

Почему не следует включать амперметр в цепь измеряемого тока и параллельно подключать к нему шунт?

Какие меры, направленные на исключение влияния сопротивления контактов на результат измерений, принимают при изготовлении шунтов?

Добавочные резисторы являются измерительными преобразователями напряжения в ток. На величину этого тока непосредственно реагируют измерительные механизмы вольтметров или обмотки напряжения ваттметров. Добавочные резисторы служат для расширения пределов измерения по напряжению вышеперечисленных приборов, а также других приборов, имеющих обмотку по напряжению, например, счетчики энергии, фазометры и т.д.

Добавочный резистор включают последовательно с измерительным механизмом (рис. 2.4). Величину сопротивления R_d резистора подбирают

таким образом, чтобы при заданном напряжении U ток в цепи был равен номинальному току измерительного механизма $I_{и}$

$$R_{д} = \frac{U_{д}}{I_{и}} = \frac{U - U_{и}}{I_{и}},$$

где $U_{и}$ – номинальное падение напряжения измерительного механизма.

Добавочные резисторы изготавливаются обычно из изолированной манганиновой проволоки, намотанной на пластины или каркасы из изоляционного материала.

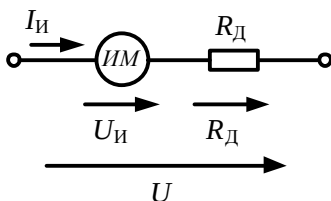


Рис. 2.4. Схема включения измерительного механизма с добавочным резистором

Они применяются в цепях постоянного и переменного тока. Добавочные резисторы, предназначенные для работы на переменном токе, имеют бифилярную обмотку для уменьшения собственной индуктивности.

Добавочные резисторы бывают внутренние и наружные. Последние выполняются в виде отдельных блоков и подразделяются на индивидуальные и калиброванные. Индивидуальный резистор применяется только с тем прибором, который с ним градуировался. Калиброванный резистор может применяться с любым прибором, номинальный ток которого равен номинальному току добавочного резистора. Используется следующий ряд номинальных токов 0,5; 1; 3; 7,5; 15 и 30 мА.

Пусть требуется вольтметром с $U_v = 100$ В и внутренним сопротивлением $R_v = 33$ кОм измерить постоянное напряжение порядка 280 В. Ток полного отклонения стрелки вольтметра составляет

$$I_v = \frac{U_v}{R_v} = \frac{100}{33000} = 0,003 \text{ А} = 3 \text{ мА},$$

тогда сопротивление добавочного резистора

$$R_{д} = \frac{U - U_v}{I_v} = \frac{280 - 100}{0,003} = 60000 \text{ Ом} = 60 \text{ кОм}.$$

Однако, при установке такого добавочного резистора, показания вольтметра всякий раз нужно умножать на $280 / 100 = 2,8$, что неудобно. Поэтому в данном случае лучше принять новый предел измерения $U = 300$ В, тогда для определения значения измеряемого напряжения следует показания прибора увеличить втрое, а сопротивление добавочного резистора принять равным

$$R_d = \frac{U - U_V}{I_V} = \frac{300 - 100}{0,003} = 66000 \text{ Ом} = 66 \text{ кОм}.$$

2.2. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы подразделяются на трансформаторы тока и напряжения и предназначены соответственно для преобразования больших переменных токов и напряжений в относительно малые токи и напряжения. Благодаря трансформаторам можно применять приборы с небольшими стандартными номинальными значениями тока и напряжения (например, 5 А и 100 В) в высоковольтных цепях, по которым могут протекать большие токи.

Измерительные трансформаторы состоят из двух изолированных друг от друга обмоток, размещенных на магнитопроводе: первичной с числом витков w_1 , и вторичной с числом витков w_2 (рис. 2.5).

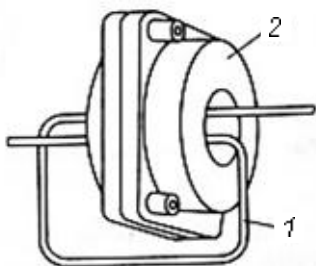


Рис. 2.5. Измерительный трансформатор: 1 – первичная обмотка ($w_1 = 1$), 2 – магнитопровод с вторичной обмоткой

При измерениях в высоковольтных цепях трансформаторы обеспечивают безопасность обслуживания приборов, присоединенных к вторичным обмоткам. Это достигается за счет электрической изоляции (*гальванической развязки*) первичной и вторичной обмоток трансформаторов и заземления металлического корпуса и вторичной обмотки. Передача сигнала происходит только по магнитному полю. При отсутствии заземления и повреждении изоляции между обмотками вторичная обмотка и подключенные к ней приборы окажутся

под высоким потенциалом, а через тело оператора может протекать опасный ток, что недопустимо.

По схемам включения в измеряемую цепь и условию работы трансформаторы тока и напряжения отличаются друг от друга. Первичная обмотка трансформаторов тока, выводы которой обозначаются буквами L_1 , L_2 (линия), включается в измеряемую цепь последовательно (рис. 2.6).

Ко вторичной обмотке, выводы которой обозначаются буквами I_1 , I_2 (измерение), подключают амперметры, последовательные обмотки ваттметров, счетчиков и других приборов. Первичная обмотка трансформатора напряжения, выводы которой обозначаются буквами A , X (начало – конец), включается в измеряемую цепь параллельно, а к выводам вторичной обмотки, обозначаемой соответственно буквами a , x , подключают

параллельно вольтметры, параллельные цепи ваттметров, счетчиков и других приборов.

Измерительный *трансформатор тока* (рис. 2.7) состоит из стержневого или кольцевого магнитопровода, набранного из тонких изолированных листов высокосортной трансформаторной стали. В трансформаторах тока первичный ток I_1 , больше вторичного I_2 . Первичная обмотка выполняется из толстого провода с малым числом витков w_1 в зависимости от номинального первичного тока $I_{1\text{ном}}$. Если $I_{1\text{ном}}$ превышает 300 А, она может состоять из одного витка в виде прямой медной шины (или стержня), проходящей через окно сердечника.

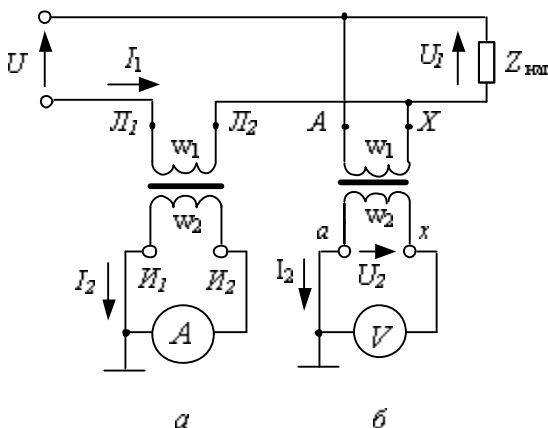


Рис. 2.6. Схемы включения измерительных трансформаторов: а - трансформаторов тока (ТТ); б - трансформаторов напряжения (ТН)

Вторичная обмотка имеет обычно большее число витков w_2 , которое рассчитывают таким образом, чтобы при подключении к ней амперметра (прибора с очень малым внутренним сопротивлением) вторичный ток бы составил номинальную величину. В соответствии с ГОСТ 7746–2001 вторичный номинальный ток $I_{2\text{ном}}$ может быть 1; 2; 2,5 или 5 А. Наиболее распространенным значением является величина в 5 А.

Трансформатор работает следующим образом. При прохождении по первичной обмотке тока I_1 в ней создается намагничивающая сила $I_1 w_1$, которая вызывает в сердечнике появление переменного магнитного потока Φ_1 . (рис. 2.7) Этот поток, пронизывая витки во вторичной обмотке, наводит в ней ЭДС E_2 , а следовательно, и ток I_2 (если подключен прибор). Ток, в свою очередь, создает намагничивающую силу $I_2 w_2$ и свой магнитный поток Φ_2 . Так как, согласно закону Ленца, этот поток направлен навстречу потоку Φ_1 , результирующий магнитный поток Φ_0 в сердечнике трансформатора небольшой. Поэтому во вторичной обмотке наводится небольшая ЭДС, которая вызывает появление сравнительно небольшого вторичного тока I_2 практически при замкнутой накоротко вторичной обмотке.

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

При конструировании трансформаторов тока стремятся уменьшить величину намагничивающего тока I_0 . С ростом тока намагничивания увеличиваются погрешности измерения, вносимые трансформатором. Значение I_0 будет тем меньше, чем выше магнитная проницаемость материала магнитопровода и чем меньше в нем потери на гистерезис и вихревые токи. При неизменном значении Φ_0 ток I_0 будет уменьшаться с сокращением длины магнитопровода и увеличением его сечения, так как при этом уменьшается магнитное сопротивление магнитопровода. Уменьшение магнитной индукции также приводит к уменьшению I_0 , поэтому в трансформаторах тока значения индукции значительно меньше, чем в силовых трансформаторах, и составляют 0,05–0,15 Тл.

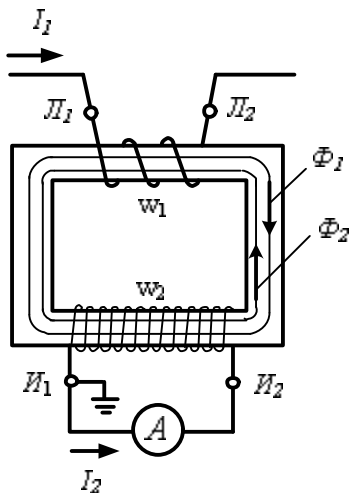


Рис. 2.7. Схема включения измерительного трансформатора тока

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

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

При размыкании вторичной цепи, что может быть, например, при отключении амперметра, исчезает встречный магнитный поток Φ_2 (рис. 2.7), следовательно, при достаточной мощности цепи первичного тока по сердечнику начинает проходить большой переменный поток Φ_1 , который вызывает наведение большой ЭДС во вторичной обмотке

трансформатора (до тысячи вольт), так как вторичная обмотка имеет большое число витков. Наличие такой большой ЭДС нежелательно потому, что это опасно для обслуживающего персонала и может принести к пробое изоляции вторичной обмотки.

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

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

По показаниям приборов, включенных во вторичные обмотки (рис. 2.8), можно определить значения измеряемых величин. Для этого их показания надо умножить на *действительные* коэффициенты трансформации K_I и K_U . Для трансформатора тока $K_I = I_1/I_2$. Для трансформатора напряжения $K_U = U_1/U_2$.

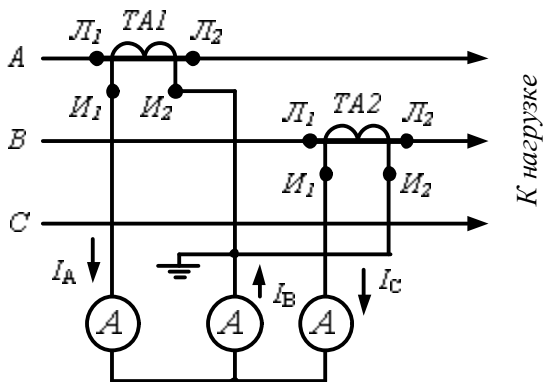


Рис. 2.8. Схема измерения линейных токов трехфазной цепи

Действительные коэффициенты трансформации обычно неизвестны, так как они зависят от режима работы трансформатора, т. е. от значений токов и напряжений, характера и значения сопротивления нагрузки вторичной цепи и частоты тока; поэтому показания прибора умножают не на действительные, а на *номинальные коэффициенты трансформации*.

Номинальный коэффициент трансформации для данного трансформатора имеет постоянное значение. Он указывается на щитке трансформатора в виде дроби, числитель которой есть номинальное значение первичной, а знаменатель – вторичной величины. Например для трансформатора тока надпись на щитке 20/5 А, означает, что при протекании через первичную обмотку номинального тока в 20 А, ток во вторичной обмотке составляет 5 А. Надпись на щитке трансформатора напряжения 10 000/100 В, означает, что номинальное первичное напряжение равно 10 кВ, и при подаче этого напряжения на первичную обмотку со вторичной обмотки будет сниматься напряжение в 100 В.

Отклонение действительных коэффициентов трансформации от номинальных значений характеризуют так называемой *токовой погрешностью* для трансформаторов тока или *погрешностью напряжения* (для трансформатора напряжения). Кроме этих погрешностей у измерительных трансформаторов имеется еще так называемая *угловая погрешность*. Она возникает из-за фазовых сдвигов между первичной и вторичной величиной, вносимых трансформатором.

В идеальном трансформаторе вектор вторичного тока I_2 сдвинут по фазе относительно вектора первичного тока I_1 на 180° . Такой же сдвиг по фазе должен быть между векторами вторичного U_2 и первичного U_1 напряжений в трансформаторе напряжения. В реальном трансформаторе угол между повернутым на 180° вектором вторичной величины и соответствующим вектором первичной величины не равен нулю, а составляет угол δ , который называется угловой погрешностью трансформатора. Погрешность считается положительной, если повернутый на 180° вектор вторичной величины опережает вектор первичной величины.

Угловая погрешность измерительных трансформаторов влияет только на показания приборов, отклонение подвижной части которых зависит от сдвига фаз между токами в цепях этих приборов. К ним относятся ваттметры, счетчики энергии и фазометры.



Рис. 2.9. Токосъемники

Самые простые модели *токосъемников* (рис. 2.9) представляют собой трансформатор тока с разъемным магнитопроводом, благодаря чему он может охватывать провод, образующий первичную обмотку. Они предназначены для бесконтактного измерения тока в цепях напряжением до 1000 В. Точность таких трансформаторов невелика, но достаточна для ориентировочных измерений.

В измерительных *трансформаторах напряжения* первичное напряжение U_1 больше вторичного U_2 , поэтому у них $w_1 > w_2$. Обе обмотки выполняются из относительно тонкого провода (первичная – из более тонкого, чем вторичная). Трансформаторы напряжения работают в режиме, близком к холостому ходу, потому что к вторичной обмотке трансформатора подключают приборы с относительно большим внутренним сопротивлением.

По внешнему виду и устройству трансформаторы напряжения мало отличаются от силовых трансформаторов на небольшие мощности. Лабораторные трансформаторы чаще всего бывают переносными на несколько пределов измерения. Для трехфазных цепей изготавливаются трехфазные трансформаторы напряжения (рис. 2.10). На трех стержнях магнитопровода располагаются три первичные и три вторичные обмотки. Первичные обмотки присоединяются к трехфазной цепи, к выводам вторичных обмоток присоединяются измерительные приборы.

Стационарные трансформаторы напряжения изготавливаются на номинальные первичные напряжения до сотен киловольт при вторичном

напряжении 150, 100 и $100/\sqrt{3}$ В. Номинальные мощности составляют от 5 до 1200 ВА. В соответствии с ГОСТ 1983–2001 трансформаторам присваиваются классы точности, выбираемые из ряда: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0.

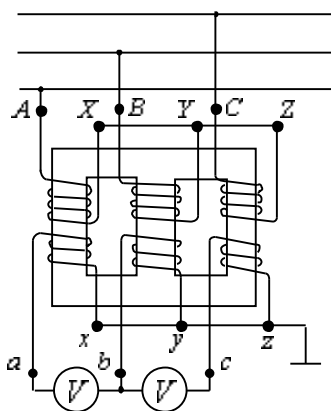


Рис. 2.10. Трехфазный трансформатор напряжения

по сравнению с силовыми трансформаторами почти в 10 раз и составит 0,1–0,3 А/мм². Уменьшение активных сопротивлений обмоток позволит снизить погрешности измерений, связанных с падением напряжений на этих сопротивлениях.

По виду охлаждения трансформаторы напряжения делятся на сухие (для напряжений до 3 кВ) и трансформаторы с заливкой маслом или изолирующей массой (для напряжений 3 кВ и выше).

Магнитная индукция в сердечнике трансформаторов напряжения достигает 0,6 – 1,0 Тл, что значительно больше, чем в трансформаторах тока. Увеличение магнитной индукции позволяет при заданном напряжении на вторичной обмотке снизить число витков в обмотках трансформатора. В результате при неизменной площади сечения обмоток можно значительно увеличить сечение проводников и уменьшить активные сопротивления обмоток, при этом плотность тока в проводниках обмоток уменьшится

2.3. Датчики тока на основе эффекта Холла

В последнее время широкое распространение получили датчики тока на основе эффекта Холла. Данный тип датчиков применим как на постоянном, так и на переменном токе, обеспечивает гальваническую развязку между силовой и измерительной цепью, потребляет малую мощность и обеспечивает высокую точность измерения тока.

Эффект Холла вызывается силой Лоренца, которая действует на носители электрических зарядов, движущиеся в магнитном поле, перпендикулярном направлению движения заряда. Датчик Холла представляет из себя пластинку проводника или полупроводника (рис. 2.11, а), к одной паре граней которой присоединен источник тока I_n , с других граней снимается выходной сигнал. При отсутствии внешнего магнитного поля B носители заряда движутся по траектории 1. Концентрация носителей зарядов у противоположных измерительных граней равна. При появлении перпендикулярного магнитного поля B за счет силы Лоренца траектория движения меняется (траектория 2). Из-за этого концентрация носителей зарядов око-

ло одной измерительной грани увеличивается, а у другой уменьшается, и между измерительными гранями появляется напряжение U_x .

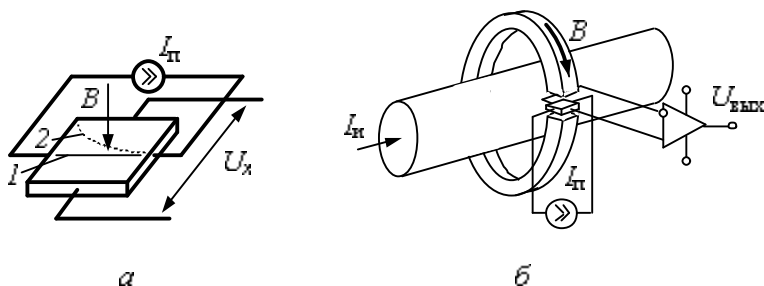


Рис. 2.11. Эффект Холла:
а – схема возникновения эффекта; б – устройство датчика

Датчики работают следующим образом. Через кольцевой сердечник из магнитомягкого материала проходит проводник, по которому течет измеряемый ток I_n . Вокруг проводника с током образуется магнитное поле, пропорциональное току. В кольцо выполняют пропил, в который вставляют датчик Холла. Выходное напряжение датчика Холла, пропорциональное измеряемому току, усиливается и подается на измерительное устройство. Рис. 2.11, б поясняет принцип работы датчика. Если кольцо с датчиком надежно изолировано от токонесущего проводника, обеспечивается гальваническая развязка между проводником, который может иметь высокий электрический потенциал и оператором. Безопасность работы зависит от электрической прочности изолятора.

Контрольные вопросы

1. Для чего служат масштабные преобразователи токов и напряжений?
2. Назовите способы расширения пределов измерений вольтметров, амперметров и ваттметров постоянного тока?
3. Каким образом можно увеличить пределы измерений тока, напряжения и мощности в цепях переменного тока?
4. Расскажите про устройство измерительного шунта. Назовите основные технические данные. Дайте определение коэффициенту шунтирования.
5. Расскажите про назначение добавочного резистора. Дайте определение коэффициенту добавочного сопротивления.
6. Почему для расширения пределов измерений электромагнитных амперметров в цепях переменного тока не используют шунты?
7. Как правильно выбрать добавочный резистор для расширения предела измерений вольтметра постоянного тока?

8. Как правильно выбрать сопротивление измерительного шунта для увеличения предела измерений амперметра постоянного тока?
9. Расскажите про устройство и принципы работы измерительных трансформаторов тока и напряжения.
10. Назовите технические данные трансформаторов тока и напряжения.
11. Дайте определение коэффициентам трансформации измерительных трансформаторов тока и напряжения.
12. Запишите выражения для новых пределов измерения амперметра, вольтметра и ваттметра при использовании трансформаторов тока, напряжения и добавочного резистора.
13. Почему вторичную обмотку трансформатора тока нельзя оставлять разомкнутой?
14. К чему приведет замыкание вторичной обмотки измерительного трансформатора напряжения?
15. Приведите возможные схемы измерения линейных токов трехфазной цепи. Почему для измерения линейных токов трехфазной нагрузки достаточно использовать только два трансформатора тока?
16. Как измерить напряжение в высоковольтной трехфазной сети переменного тока? Приведите возможные схемы включения измерительных приборов и трансформаторов напряжения.
17. Чем вызваны токовая погрешность и погрешность напряжения у измерительных трансформаторов? Что такое угловая погрешность?
18. Расскажите про устройство и назначение токовых клещей.
19. Что представляет собой датчик Холла? При измерении каких физических величин он может быть использован?

3. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

3.1. Измерение постоянных токов и напряжений

Измерение постоянных токов и напряжений в большинстве случаев производится посредством магнитоэлектрических амперметров и вольтметров. Для этой цели применяют также электромагнитные, электродинамические, ферродинамические и электростатические приборы, а также потенциометры постоянного тока и цифровые приборы.

Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры. Измерительные механизмы магнитоэлектрических амперметров и вольтметров принципиально не различаются. В зависимости от назначения прибора (для измерения тока или напряжения) меняется его измерительная цепь. В амперметрах измерительный механизм включается в цепь непосредственно или при помощи шунта. В вольтметрах последовательно с измерительным механизмом включается добавочный резистор, и прибор подключается к тем точкам схемы, между которыми необходимо измерить напряжение.

Амперметр без шунта применяется в том случае, если весь измеряемый ток можно пропустить через токоподводящие пружинки (или растяжки) и обмотку рамки измерительного механизма. Обычно значение этого тока не превышает 20–30 мА, т. е. такая схема возможна только для микро- и миллиамперметров.

Характер измерительной цепи в значительной степени определяется также допустимой температурной погрешностью и пределом измерения прибора.

Изменение температуры прибора сказывается на его работе следующим образом.

1. При повышении температуры удельный противодействующий момент пружин (или растяжек) уменьшается примерно на 0,2–0,4% на каждые 10 °С повышения температуры. Магнитный поток постоянного магнита падает приблизительно на 0,2% на каждые 10 °С повышения температуры.

Так как ослабление пружин и уменьшение магнитного потока вызывают одинаковые изменения противодействующего и вращающего моментов по значению, но с разными знаками, то эти два явления практически взаимно компенсируют друг друга.

2. Изменяется электрическое сопротивление обмотки рамки и пружин. Это является основным источником температурной погрешности магнитоэлектрических приборов.

В большинстве случаев температурная погрешность вольтметров является незначительной. Это объясняется тем, что температурный коэффициент сопротивления (ТКС) цепи вольтметра определяется не толь-

ко ТКС «медной» части обмотки измерительного механизма, но и добавочного резистора, выполняемого из материала с очень малым ТКС.

Наиболее неблагоприятным в отношении влияния температуры является амперметр с шунтом. При повышении температуры и неизменных значениях измеряемого тока и сопротивления шунта $R_{ш}$ (шунт, как указывалось выше, выполняется из манганина) ток I , протекающий через измерительный механизм, уменьшается и появляется отрицательная погрешность.

Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры выпускают переносными и щитовыми. Переносные приборы в большинстве случаев делают высокоточными (классов 0,1 – 0,5), многопредельными (до нескольких десятков пределов) и часто комбинированными (например, вольтамперметрами). Щитовые приборы выпускают обычно однопредельными, чаще всего классов точности 1,0 и 1,5.

Приборы электродинамической системы предназначены для измерения токов от 10 мА до 100 А и напряжений от 100 мВ до 600 В. По точности они эквивалентны приборам магнитоэлектрической системы, но потребляют значительно большую мощность и имеют неравномерную шкалу.

Приборы ферродинамической системы применяются для измерения постоянных токов и напряжений очень редко из-за низкой точности и большой потребляемой мощности.

Приборы электромагнитной системы используются для измерения токов от 10 мА до 200 А и напряжений от 1 В до 75 В. Наиболее точные приборы этой системы имеют классы точности 0,2; 0,5. Их главное достоинство – низкая стоимость.

Для измерения постоянных напряжений в диапазоне от нескольких вольт до нескольких сотен киловольт применяются также электростатические вольтметры. Их преимущество заключается в ничтожном потреблении мощности от объекта измерения. Наиболее точные приборы этой системы имеют класс точности 0,05. Однако точные электростатические приборы очень сложны и дороги и выпускаются в небольшом количестве. Подавляющее же большинство вольтметров этой системы имеет классы точности 0,5; 1,0 и 1,5.

При напряжениях, не превышающих 600 В, вместо приборов электростатической системы можно применять вольтметры электронной системы. Они также потребляют ничтожную мощность. Класс точности электронных вольтметров постоянного тока невысокий: лучшие из них имеют классы точности 0,5; 1,0.

В тех случаях, когда необходимо измерить напряжение или ток с высокой точностью, используют потенциометры постоянного тока, цифровые вольтметры и амперметры. Классы точности наиболее точных потенциометров 0,001; 0,002, цифровых вольтметров 0,002; 0,005, цифро-

вых амперметров 0,02. Цифровые вольтметры измеряют напряжение до нескольких тысяч вольт, а цифровые амперметры – ток до нескольких ампер. Потенциометрами постоянного тока при использовании делителей напряжения можно измерять напряжение до 1000 В.

Измерение тока при помощи потенциометра проводят косвенным путем – искомый ток определяют по падению напряжения на образцовом резисторе. Погрешность измерения в этом случае возрастает за счет погрешностей образцового резистора. Преимуществом потенциометров и цифровых приборов является малое потребление мощности, особенно при измерении напряжений.

Измерение больших токов и напряжений. Шунтирование магнитоэлектрических приборов дает возможность измерять постоянные токи до нескольких тысяч ампер. Отдельные шунты на токи свыше 10 кА не изготавливаются из-за их больших размеров и большой стоимости. Поэтому для измерения больших токов часто используют несколько шунтов, соединенных параллельно (рис. 3.1).

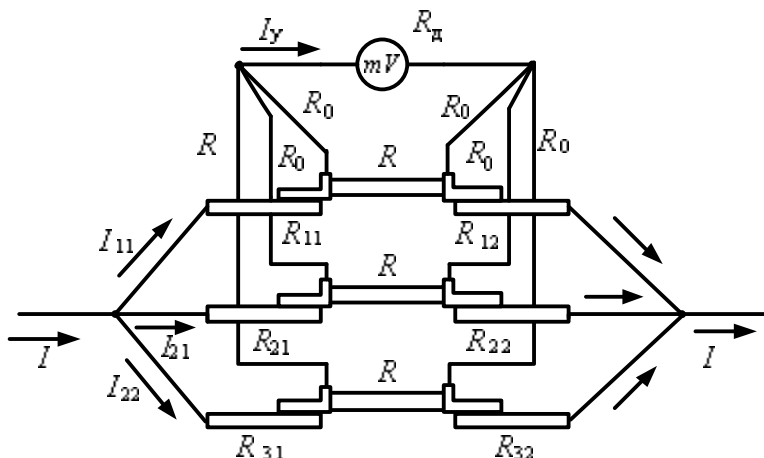


Рис. 3.1. Измерение больших токов с использованием параллельного соединения шунтов

Несколько одинаковых шунтов подключают в разрыв шины, а проводники от потенциальных зажимов всех шунтов подводят к одному и тому же прибору. При равенстве сопротивлений R шунтов и сопротивлений R_0 потенциальных проводников наличие переходных сопротивлений в местах присоединения шунтов к шинам R_{11} , R_{12} , R_{21} , R_{22} , R_{31} и R_{32} не отражается на показаниях прибора, а ведет лишь к неравномерному распределению токов между шунтами. Ток I_y , протекающий через прибор, определяется только сопротивлениями шунтов, потенциальных проводни-

ков и прибора, т. е. точно так же, как и при измерении тока с помощью одного шунта. Практически используют несколько однотипных шунтов.

Но этот способ не дает возможности отделить цепь прибора от цепи измеряемого тока, что не позволяет применять его в цепях высокого напряжения, где требуется заземлять цепь прибора для защиты обслуживающего персонала. При измерении тока в цепях высокого напряжения рекомендуется использовать гальванически развязанную измерительную цепь на основе датчиков Холла.

Для измерения постоянного напряжения до 6 кВ чаще всего применяют магнитоэлектрические вольтметры с добавочными резисторами.

При больших напряжениях использование добавочных резисторов сопряжено с большими трудностями, вызванными их громоздкостью и значительной потребляемой ими мощностью. В этих случаях применяют электростатические вольтметры, позволяющие измерять напряжение до 300 кВ (вольтметр типа С101).

3.2. Измерение переменных токов и напряжений электромеханическими приборами без преобразователей рода тока

Общим для электромагнитных, электродинамических, ферродинамических и электростатических приборов является то, что все они могут быть использованы для измерения действующих значений переменных токов и напряжений (электростатические приборы – для измерений действующих значений только напряжений).

Однако ввиду различий в устройстве измерительных механизмов и измерительных схем каждая из указанных групп приборов отличается своими достоинствами и недостатками, рабочим частотным и температурным диапазонами, чувствительностью к различного рода помехам и пр.

Знание свойств амперметров и вольтметров различных групп позволяет в зависимости от конкретных условий измерения правильно решить вопрос о выборе прибора.

Электромагнитные амперметры и вольтметры. В амперметрах катушка измерительного механизма включается последовательно в цепь измеряемого тока. На большие токи амперметры непосредственного включения обычно не делаются из-за сильного влияния на показания прибора магнитного поля токоподводящих проводов и значительного нагрева шины.

Щитовые амперметры выпускаются однопредельными; переносные – в ряде случаев на несколько пределов, обычно не больше чем на четыре. Изменение предела измерения производится путем секционирования обмотки катушки и включения секций последовательно или параллельно. Если, например, обмотку катушки разделить на две секции, то их последовательное или параллельное соединение дает возможность изменить пределы в отношении 1:2.

Расширение пределов измерения электромагнитных амперметров на переменном токе производится также при помощи измерительных трансформаторов тока.

Из дополнительных погрешностей электромагнитных амперметров отметим температурную, частотную и погрешность от гистерезиса. Температурная погрешность возникает вследствие зависимости упругости пружинок от температуры. С этой погрешностью приходится считаться только для приборов класса точности 0,2 и выше. Частотная погрешность возникает главным образом из-за вихревых токов в сердечнике и других металлических частях измерительного механизма, пронизываемых магнитным потоком катушки. Погрешность от гистерезиса проявляется только при измерениях в цепях постоянного тока. Ее уменьшают, применяя для сердечников материалы с малой коэрцитивной силой (например, пермаллой).

В электромагнитных вольтметрах катушка и добавочный резистор соединены последовательно. Для компенсации температурной погрешности отношение сопротивления добавочного резистора из манганина к сопротивлению катушки из меди не должно быть меньше некоторого значения, определяемого допускаемой температурной погрешностью. Поэтому в вольтметрах на малые пределы измерения уменьшают сопротивление катушки, т. е. уменьшают число ее витков.

Из этих же соображений у переносных вольтметров изменение пределов измерения в сторону малых значений производится не за счет изменения сопротивления добавочного резистора, а путем секционирования обмотки катушки и переключения секций с последовательной схемы на параллельную. Для больших пределов включаются разные добавочные резисторы. Для измерения напряжений свыше 600 В применяются измерительные трансформаторы напряжения.

Частотная погрешность у электромагнитных вольтметров больше, чем у амперметров. Это объясняется зависимостью реактивных сопротивлений катушки и добавочного резистора от частоты.

Электродинамические амперметры и вольтметры. У электродинамических амперметров для токов до 0,5 А неподвижные и подвижные катушки соединяются последовательно. Для такой схемы $I_1 = I_2 = I$; $\cos\psi = 1$. Если противодействующий момент создается упругими элементами, угол отклонения подвижной части будет равен:

$$\alpha = S(\alpha)I^2.$$

Если бы $S(\alpha) = \text{const}$, то шкала прибора была бы квадратичной. Однако в применяемых конструкциях множитель $S(\alpha)$ уменьшается с увеличением α , что приближает шкалу к равномерной начиная примерно с 25% ее длины.

При последовательном включении катушек компенсации частотной и температурной погрешностей не требуется, так как изменения частоты (до 2000–3000 Гц) и температуры оказывают незначительное влияние на показания приборов.

В амперметрах на токи свыше 0,5 А подвижная и неподвижные катушки включаются параллельно. В этом случае необходимо принимать специальные меры для компенсации частотной и температурной погрешностей, которые возникают в результате перераспределения токов в катушках при изменении частоты и температуры.

Электродинамические амперметры выпускаются чаще всего на два предела измерения. Изменение пределов производится путем включения неподвижных катушек последовательно и параллельно. Для расширения пределов измерения используются измерительные трансформаторы тока.

У электродинамических вольтметров неподвижные и подвижная катушки и добавочный резистор включаются последовательно.

Отношение сопротивления добавочного резистора из манганина к сопротивлению катушек из меди не должно быть меньше заданного значения, определяемого допускаемой температурной погрешностью. С уменьшением предела измерения значение сопротивления добавочного резистора будет уменьшаться, поэтому для того, чтобы сохранить неизменным указанное отношение, надо уменьшить и сопротивление катушек. Это потребует, при условии сохранения вращающего момента, увеличения номинального тока.

Частотная погрешность, возникающая вследствие изменения индуктивного сопротивления вольтметра с изменением частоты (изменение активного сопротивления до частот в несколько тысяч герц незначительно), может быть скомпенсирована при помощи шунтирования части добавочного резистора конденсатором.

Основная область применения электродинамических амперметров и вольтметров – точные измерения в цепях переменного тока, чаще всего в диапазоне частот от 45–50 Гц до нескольких сотен или тысяч герц. Их применяют также в качестве образцовых при поверке и градуировке других приборов, а иногда и для измерений в цепях постоянного тока.

Ферродинамические амперметры и вольтметры. Ферродинамические амперметры и вольтметры имеют в принципе такие же схемы включения неподвижных и подвижных катушек, как и соответствующие электродинамические приборы. Некоторая разница может быть лишь в элементах схем, предназначенных для компенсации погрешностей. Так же как и у электродинамических приборов, угол отклонения подвижной части ферродинамических амперметров и вольтметров пропорционален соответственно квадрату измеряемого тока или напряжения.

Для амперметров квадратичная шкала является нежелательной. Обычно в процессе измерений нагрузка, а следовательно, и ток могут

меняться в широких пределах, т. е. вся шкала является рабочей. Для улучшения характера шкалы рабочий воздушный зазор делается неравномерным. Это позволяет приблизить шкалу к равномерной.

Ферродинамические вольтметры применяются главным образом как стационарные приборы относительно малой точности. В большинстве случаев они измеряют номинальное напряжение сети и отклонение напряжения от номинального значения. Поэтому квадратичная шкала, сжатая в начале и растянутая в конце, для этих условий является даже предпочтительнее равномерной.

Ферродинамические приборы кроме температурной и частотной погрешностей имеют еще специфические погрешности, вызванные наличием сердечника. К ним относятся погрешности от нелинейности кривой намагничивания, от потерь в материале магнитопровода и от гистерезиса. Первые две погрешности для амперметров и вольтметров можно учесть при градуировке. Их компенсация посредством специальных схем требуется только для ваттметров.

Погрешность от гистерезиса проявляется только в том случае, если измерения или градуировка производятся в цепях постоянного тока. Для уменьшения этой погрешности магнитопроводы изготавливают из материалов с малой коэрцитивной силой.

Ферродинамические амперметры и вольтметры имеют в ряде случаев несколько пределов измерения. Для расширения пределов измерения этих приборов применяются те же способы, что и для электродинамических приборов.

Основная область применения ферродинамических амперметров и вольтметров – измерение в цепях переменного тока частотой 50 Гц в условиях механических воздействий (тряска, вибрации, удары) при классе точности приборов 1,5 – 2,5.

3.3. Измерение переменных токов и напряжений магнитоэлектрическими приборами с преобразователями рода тока

Общие замечания. Высокая чувствительность, точность и малое потребление мощности выгодно отличают магнитоэлектрические приборы от других электромеханических приборов. Ввиду этого понятно стремление использовать магнитоэлектрические приборы для измерений на переменном токе. Эта задача решена путем преобразования переменного тока в постоянный с последующим его измерением магнитоэлектрическим прибором.

В качестве преобразователей переменного тока в постоянный применяются полупроводниковые диоды, термопреобразователи и транзисторы. В соответствии с типом используемого преобразователя различают приборы выпрямительные, термоэлектрические и электронные.

Полупроводниковые диоды имеют большой срок службы, малые габариты и массу, что позволяет делать выпрямительные приборы компактными, простыми, надежными в работе и отличающимися высокой чувствительностью и малым потреблением мощности. Однако нелинейность характеристик полупроводниковых диодов, их температурная и частотная зависимости, а также нестабильность во времени приводят к снижению точности выпрямительных приборов. Класс точности выпрямительных приборов обычно 1,5 – 2,5. Частотный диапазон таких приборов ограничен пределом 40 – 50 кГц, что объясняется влиянием собственной емкости диодов.

Термоэлектрические преобразователи обладают малыми емкостями и индуктивностями, ввиду чего показания термоэлектрических приборов мало зависят от частоты. Использование теплового действия измеряемого тока в термоэлектрических приборах приводит к заметной потребляемой мощности. Термоэлектрические приборы применяются главным образом в качестве высокочастотных амперметров.

Электронные измерительные приборы занимают особое место среди магнитоэлектрических приборов с преобразователями переменного тока в постоянный. В ряде случаев электронные приборы оказываются незаменимыми, и их применение значительно расширяет возможности электроизмерительной техники. К числу основных достоинств электронных приборов нужно отнести их повышенную чувствительность по сравнению с другими электромеханическими приборами переменного тока. Указанное свойство достигается за счет использования усилительных свойств транзисторов. Приборы могут работать в широком диапазоне частот – от постоянного тока сотен мегагерц. Практическое отсутствие потребления мощности от исследуемого источника позволяет использовать их для измерений в маломощных цепях.

Наряду с достоинствами электронные приборы обладают также и недостатками, к числу которых следует отнести их сравнительно невысокую точность и необходимость внешних источников питания.

Выпрямительные приборы. Эти приборы представляют собой соединение магнитоэлектрического измерительного механизма с выпрямителями на германиевых или кремниевых диодах.

В зависимости от схемы включения диодов и измерительного механизма производится одно- или двухполупериодное выпрямление переменного тока. В схемах первого типа (рис. 3.2, *а*) через измерительный механизм проходит только одна полуволна переменного тока, а обратная – пропускается через диод D_2 и резистор R . Цепь из диода D_2 и резистора R ($R = R_{и}$) в этой схеме используется для выравнивания сопротивления выпрямительной схемы в обе половины периода, а также защищает от пробоя диод D_1 при обратной полуволне тока и при использовании этой схемы в вольтметре.

В схемах второго типа выпрямленный ток проходит через измерительный механизм в обе половины периода, и, следовательно, чувствительность этих схем выше, чем у однополупериодных. На рис. 3.2, б показана наиболее распространенная двухполупериодная схема выпрямления – мостовая.

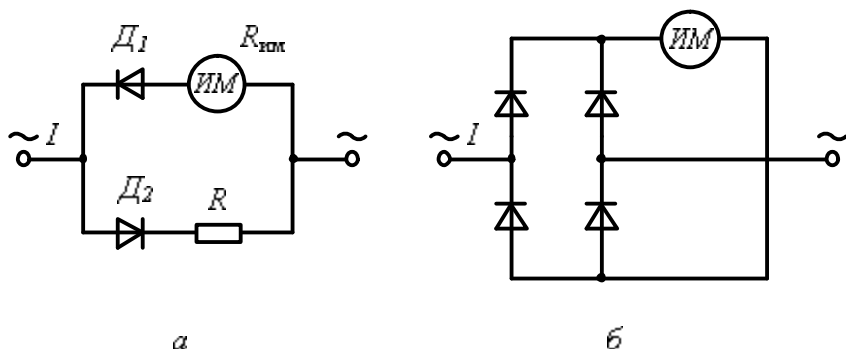


Рис. 3.2. Магнитоэлектрический измерительный механизм с выпрямителями: а – однополупериодное выпрямление; б – двухполупериодное выпрямление

В мостовых схемах включения на каждый диод приходится меньшее напряжение, чем в однополупериодных. Поэтому для измерения малых напряжений применяют однополупериодную схему выпрямления.

Иногда в мостовых схемах двухполупериодного выпрямления используются лишь два диода, а остальные заменяются постоянными резисторами. При этом уменьшается температурная погрешность схемы, однако снижается ее чувствительность.

У выпрямительных приборов отклонение подвижной части пропорционально среднему значению измеряемого тока $I_{\text{ср}}$. При измерениях в цепях переменного тока обычно нужно знать действующее значение тока (напряжения). Учитывая, что действующее значение тока связано со средним равенством $I_{\text{ср}} = I / k_{\text{ф}}$, где $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы кривой тока.

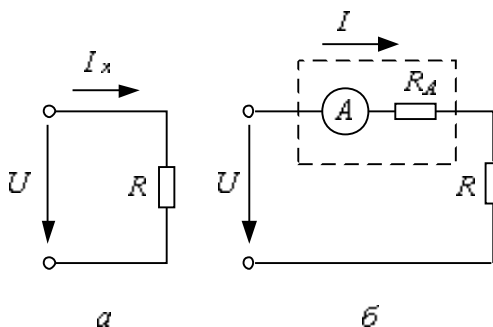
Очевидно, что выпрямительный прибор может быть отградуирован в действующих значениях тока (напряжения) только для заданной формы кривой (для синусоиды $k_{\text{ф}} = 1,11$). Если же форма кривой измеряемого тока (напряжения) отлична от заданной, в показаниях прибора появляется погрешность.

3.4. Методические погрешности

С включением амперметра или вольтметра в электрическую цепь изменяется измеряемая величина. Это вызвано тем, что сопротивление

амперметра отлично от нуля, а сопротивление вольтметра не равно бесконечности. Погрешность, возникающая в результате включения измерительных приборов в исследуемую цепь и обусловленная потребляемой ими мощностью, называется *методической погрешностью*.

Определим методическую погрешность, возникающую при включении амперметра в электрическую цепь. Пусть требуется измерить ток в цепи, имеющей сопротивление R , к которой приложено напряжение U (рис. 3.3, а). Ток I_x в этой цепи будет равен:



$$I_x = U / R.$$

После включения амперметра, имеющего сопротивление R_A , ток в цепи изменится и станет равным:

$$I = U / (R + R_A).$$

Амперметр покажет именно это значение тока (рис. 3.3, б). Методическая погрешность, вызванная

Рис. 3.3. Влияние амперметра на измеряемое включением амперметра, составит:

$$\delta_A = \frac{I - I_x}{I_x} = - \frac{R_A / R}{1 + R_A / R}.$$

Обычно $R_A \ll R$, поэтому $\delta_A \approx -R_A / R$. Так как

$$R_A / R = I^2 R_A / I^2 R = P_A / P,$$

то $\delta_A \approx -P_A / P$, где P_A – мощность, потребляемая амперметром; P – мощность, потребляемая исследуемой цепью.

Рассмотрим случай, когда надо измерить падение напряжения U_x на некотором сопротивлении R :

$$U_x = IR = ER / (R + R_0),$$

где E – ЭДС источника тока; R_0 – внутреннее сопротивление источника тока (рис. 3.4, а).

После включения вольтметра, имеющего собственное сопротивление R_V , параллельно сопротивлению R напряжение U , измеренное вольтметром, составит:

$$U = \frac{ERR_V / (R + R_V)}{R_0 + RR_V / (R + R_V)} = \frac{ERR_V}{RR_0 + R_V R_0 + RR_V}.$$

Методическая погрешность измерения δ_V в этом случае будет равна:

$$\delta_V = \frac{U - U_x}{U_x} = -\frac{R/R_V}{1 + R/R_V + R/R_0}.$$

Учитывая, что

$$\frac{R}{R_V} = \frac{U^2/R_V}{U^2/R} = \frac{P_V}{P},$$

и обычно $R_V \gg R$, получаем:

$$\delta_V \approx -\frac{P_V/P}{1 + R/R_0},$$

где P_V – мощность, потребляемая вольтметром; P – мощность, потребляемая исследуемым резистором R (рис. 3.4, б).

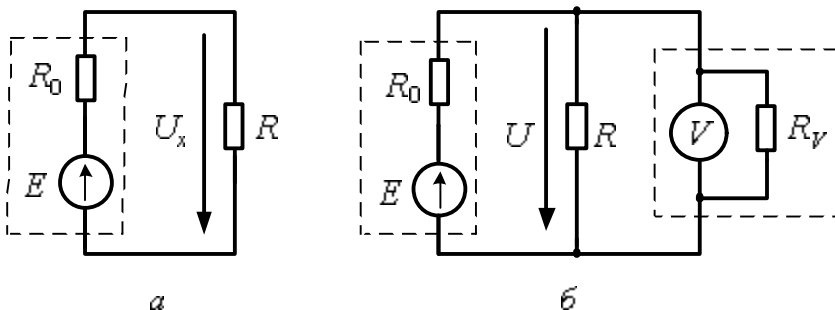


Рис. 3.4. Влияние вольтметра на измеряемое напряжение

Следовательно, как при измерении тока, так и при измерении напряжения необходимо выбирать такие приборы, у которых потребляемая мощность значительно меньше мощности, рассеиваемой в исследуемой цепи. Этим и объясняется стремление иметь в амперметрах возможно меньшее, а в вольтметрах возможно большее сопротивление.

3.5. Методы измерения переменных токов и напряжений промышленной частоты

Направление переменного тока и полярность переменного напряжения промышленной частоты периодически изменяются. По действующим в России стандартам этот период равен 0,02 с, а промышленная частота, соответственно, равна 50 Гц.

Для оценки переменных токов и напряжений используют понятия *действующего* (эффективного) значения, *амплитудного* (максимального)

значения и *средневыпрямленного* значения. Вольтметры и амперметры всех систем обычно градуируют в действующих значениях при синусоидальной форме кривой тока. При несинусоидальной форме кривой будет возникать дополнительная погрешность.

Действующим значением переменного напряжения произвольной формы называли такое постоянное напряжение, под воздействием которого на активной нагрузке того же самого сопротивления выделяется такое же количество тепла. Первые стрелочные приборы для измерения эффективного значения переменного напряжения были тепловыми – нагревающийся под действием протекающего тока провод из высокоомного сплава, удлиняясь, перемещал стрелку. На шкале такого прибора там, где обозначены его характеристики, можно увидеть знак, изображенный на рис. 3.5, *а*. К сожалению, тепловые приборы имеют множество недостатков, делающих их малоприспособными для точных измерений, а те, у кото-

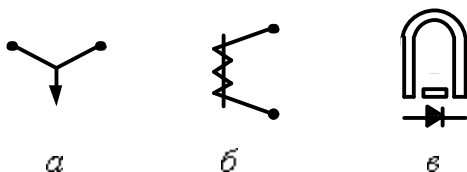


Рис. 3.5. Условные обозначения приборов для измерения переменного тока или напряжения

рых недостатки (например, зависимость показаний от температуры окружающей среды) устранены, слишком сложны и дороги.

Согласно закону Джоуля, количество тепла, выделяющегося на нагрузке с активным сопротивлением, про-

порционально квадрату приложенного к нему напряжения, поэтому эффективное значение часто называют среднеквадратичным. Чтобы измерить эффективное значение переменного напряжения (тока), необходимо в течение некоторого времени возводить в квадрат его мгновенные значения, усреднить результаты и извлечь из среднего квадратный корень. Благодаря тому, что тяговое усилие электромагнита пропорционально именно квадрату протекающего в обмотке тока, оказалось удобным на основе этого механизма строить стрелочные приборы так называемой электромагнитной системы, измеряющие эффективное значение тока $I_{\text{эфф}}$. Опознать такие измерители можно по знаку (рис. 3.5, *б*) в нижней части шкалы. Электромагнитные вольтметры и амперметры широко распространены в энергетике, где их недостатки – низкая чувствительность и ограниченный частотный диапазон – не имеют большого значения. А нелинейная шкала (она сжата в начале и сильно растянута в конце) часто бывает даже удобнее – если измеряемое напряжение близко к предельному для вольтметра, то незначительные его изменения заметнее.

Измеряя переменные напряжение или ток, изменяющиеся по заранее известному закону, производить сложные вычисления в реальном време-

ни вовсе не обязательно. Зная закон, это можно выполнить заранее. Известно, например, что действующее значение величины, изменяющейся по синусоиде, равно 0,707 ее амплитуды. Поэтому шкалу вольтметра, измеряющего амплитуду синусоидального напряжения, можно проградуировать так, что он будет показывать эффективное значение. Подобным образом построены многие полупроводниковые электронные высокочастотные вольтметры и милливольтметры, у которых амплитудный детектор смонтирован в выносном пробнике.

Часто вместо эффективного измеряют другое значение переменного напряжения – *средневыпрямленное* – постоянную составляющую несглаженного пульсирующего напряжения или тока на выходе двуполупериодного выпрямителя ($U_{ср.в.выпр}$ или $I_{ср.в.выпр}$). Оно равно $2/\pi \approx 0,637$ амплитуды синусоиды, что в 1,11 раза меньше ее эффективного значения. Подавляющее большинство универсальных низкочастотных измерительных приборов (авометров, мультиметров) показывают не эффективное, а именно средневыпрямленное значение переменного напряжения (тока), умноженное на этот поправочный коэффициент.

На шкалу стрелочных приборов такого типа обычно наносят знак (рис. 3.5, в), символизирующий магнитоэлектрический измерительный механизм, оснащенный полупроводниковым выпрямителем. Схема выпрямителя, примененного в ампервольтметре Ц4312, изображена на рис. 3.6. Трансформатор T_1 , устраняет влияние постоянной составляющей измеряемой величины на результат (если, конечно, эта составляющая невелика и не вызывает насыщения магнитопровода трансформатора). При измерениях сопротивления и постоянных тока и напряжения микроамперметр PA_1 , отключен от выпрямителя не показанными на схеме контактами переключателя пределов измерения.

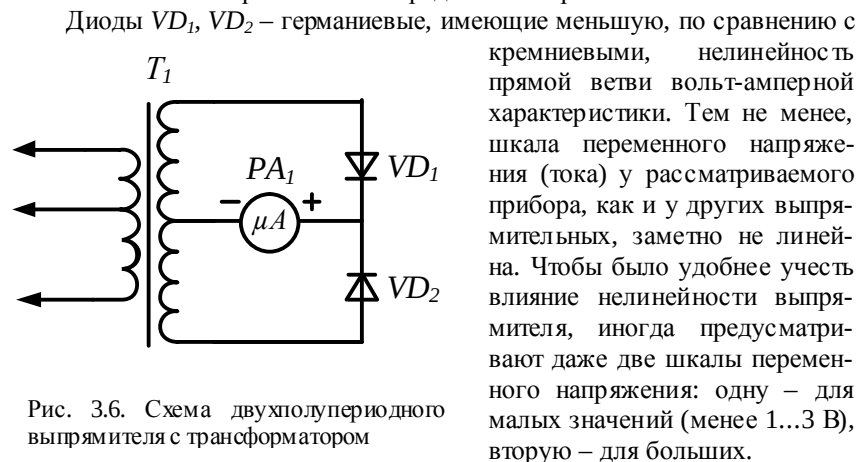


Рис. 3.6. Схема двуполупериодного выпрямителя с трансформатором

Диоды VD_1 , VD_2 – германиевые, имеющие меньшую, по сравнению с кремниевыми, нелинейность прямой ветви вольт-амперной характеристики. Тем не менее, шкала переменного напряжения (тока) у рассматриваемого прибора, как и у других выпрямительных, заметно не линейна. Чтобы было удобнее учесть влияние нелинейности выпрямителя, иногда предусматривают даже две шкалы переменного напряжения: одну – для малых значений (менее 1...3 В), вторую – для больших.

Очень простой выпрямитель измеряемого переменного напряжения применяют в портативном цифровом мультиметре М-830 и ему подобных. Его схема показана на рис. 3.7. Здесь PV_1 – АЦП мультиметра, выполненный на микросхеме ICL7106 (аналогичная отечественная – К572ПВ5), который действует по принципу двойного интегрирования, выводя на ЖК индикатор среднее значение поданного на вход напряжения. Выпрямитель на диоде VD_1 – однополупериодный, постоянная составляющая на его выходе вдвое меньше средневыпрямленного значения. Необходимой коррекции показаний достигают подключением катода диода к точке соединения резисторов R_1 и R_2 .

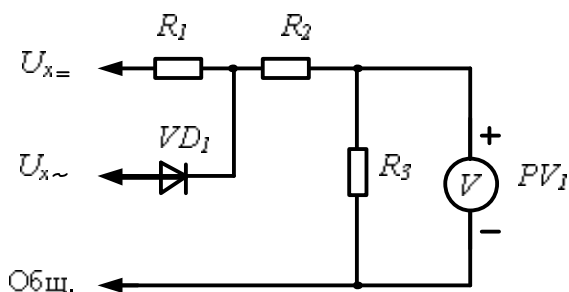


Рис. 3.7 Схема однополупериодного выпрямителя

Допустимое обратное напряжение (1000 В) диода 1N4007 обусловило ограничение верхнего предела измерения переменного напряжения значением 750 В, хотя остальные узлы мультиметра позволяют вести отсчет до 1999 В. Никаких мер по устранению по-

грешности, вносимой нелинейностью диода, не принято, хотя абсолютное значение этой погрешности – несколько десятых долей вольта – превышает цену единицы младшего разряда индикатора (0,1 В) на пределе измерения «200 В». Более чувствительные пределы измерения просто не предусмотрены. На достоверность показаний такого прибора, особенно при измерении переменного напряжения менее 10...20 В и частотой выше нескольких килогерц, рассчитывать не стоит.

Следует еще раз напомнить, что показания приборов, проградуированных в эффективных, но фактически измеряющих совсем другие значения (а это подавляющее большинство всех применяемых в быту и радиолюбительской практике приборов), справедливы только для синусоидальных напряжения и тока.

Для характеристики формы периодических сигналов введены два параметра: коэффициент амплитуды $k_a = I_{\text{ампл}} / I_{\text{эфф}}$ и коэффициент формы $k_{\text{ф}} = I_{\text{эфф}} / I_{\text{ср.выпр}}$.

При синусоидальной форме сигнала рассмотренные значения составляют:

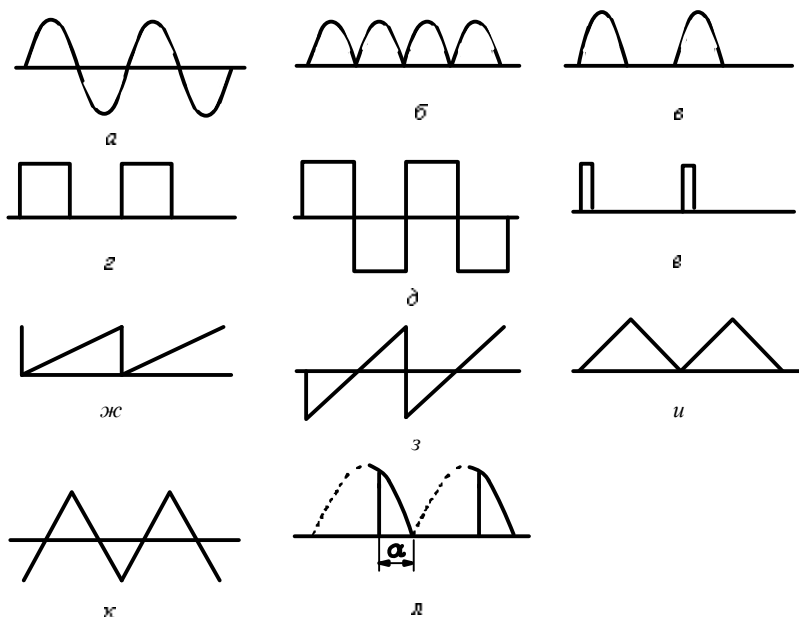


Рис. 3.8. Электрические сигналы разнообразной формы

Меандр (рис. 3.8, г, д). Однополярным меандром называют напряжение прямоугольной формы, которое одну половину периода равно своему максимальному значению, а другую – нулю (рис. 3.8, г). Среднее значение однополярного меандра равно половине амплитудного. Мощность, выделяемая током такой формы в нагрузке, вдвое меньше, чем мощность от постоянного тока, поэтому эффективное напряжение сигнала в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудного. В случае двуполярного меандра (рис. 3.8, д) напряжения $U_{\text{ампл}}$, $U_{\text{ср}}$, $U_{\text{эфф}}$ совпадают между собой.

Последовательность прямоугольных импульсов (рис. 3.8, е) длительностью t с периодом повторения T . Для такого сигнала существует понятие «скважность», которая обычно обозначается буквой Q и определяется как отношение периода к длительности импульсов $Q = T/t$. Поскольку ток сигнала такой формы действует в Q раз меньше время чем постоянный ток, среднее значение сигнала в Q раз меньше амплитудного, а эффективное – в $\sqrt{Q}$ раз.

Пилообразное напряжение (рис. 3.8, ж, з). Для него среднее значение (средневыпрямленное для двухполярного) равно половине амплитудного (площадь треугольника равна половине произведения основания на высоту). Для расчета эффективного значения следует определить площадь под параболой, описывающей зависимость квадрата напряжения от времени, оно получается $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудного.

То же соотношение справедливо и для сигнала треугольной формы (рис. 3.8, и), в том числе и двухполярного (рис. 3.8, к).

Напряжение на выходе фазоимпульсного регулятора (рис. 3.8, л). Его форму характеризует угол проводимости α , который может в общем случае меняться в пределах от 0 до π . Амплитудное значение напряжения такой формы составляет

$$U_{\text{ампл}} = U_{\text{ампл.с}} \sin \alpha ;$$

среднее –

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{ампл.с}} (1 - \cos \alpha) / \pi ;$$

эффективное –

$$U_{\text{эфф}} = U_{\text{ампл.с}} \sqrt{(\alpha - (\sin \alpha) / 2) / 2\pi} ,$$

где $U_{\text{ампл.с}}$ – амплитудное напряжение сети на входе регулятора, а угол α в последнюю формулу должен подставляться в радианах.

На рис. 3.9 приведены зависимости, описываемые этими формулами.

В таблице приведены отношения среднего и эффективного значений к амплитудному, а также коэффициенты формы и амплитуды для рассмотренных сигналов.

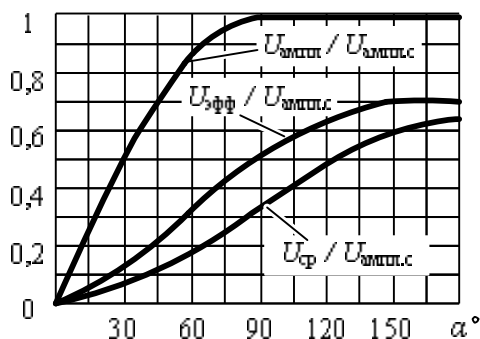


Рис. 3.9. Зависимость соотношений напряжений на выходе фазоимпульсного регулятора от угла отсечки α

Существуют электронные вольтметры, измеряющие истинное эффективное значение напряжения произвольной формы. Импортные приборы такого класса можно опознать по надписи «True RMS» на передней панели. Соответствующую информацию об отечественных приборах можно найти только в их паспортах и технических описаниях.

К ним относится милливольтметр ВЗ-48, принцип действия которого поясняет схема, изображенная на рис. 3.10. Через нагреватель вакуум-

ного термопреобразователя U_x протекает переменный ток, пропорциональный измеряемому напряжению и повторяющий его форму. Нагреватель термопреобразователя U_2 подключен последовательно с миллиамперметром $РА$ к выходу усилителя A_2 .

Термопары преобразователей соединены встречно-последовательно и соединены с входом усилителя так, что он оказывается охваченным отрицательной ОС. Таким образом поддерживается равенство тока, текущего через микроамперметр, эффективному значению тока, текущего через нагреватель преобразователя U_1 .

Таблица

Форма сигнала по рис.3.8	$U_{\text{ср.выпр}}/U_{\text{max}}$	$U_{\text{эфф}}/U_{\text{max}}$	k_a	k_{ϕ}
$a, б$	$2/\pi \approx 0,637$	$1/\sqrt{2} \approx 0,707$	$\sqrt{2} \approx 1,41$	$\pi/(2\sqrt{2}) \approx 1,11$
$в$	$1/\pi \approx 0,318$	$1/2$	2	$\pi/2 \approx 1,57$
$г$	$1/2$	$1/\sqrt{2} \approx 0,707$	$\sqrt{2} \approx 1,41$	$\sqrt{2} \approx 1,41$
$е$	$1/Q$	$1/\sqrt{Q}$	$\sqrt{Q}$	$\sqrt{Q}$
$жс, з, и, к$	$1/2$	$1/\sqrt{3} \approx 0,577$	$\sqrt{3} \approx 1,73$	$2/\sqrt{3} \approx 1,1$

Из-за тепловой инерции преобразователей время установления показаний милливольтметра довольно велико (4 с). Так как существенную погрешность вносит дрейф нуля усилителя постоянного тока A_v , приняты меры к его снижению – усилитель выполнен по схеме «модулятор–демодулятор» (МДМ). Частотный диапазон измерений ограничен полосой пропускания усилителя A_v .

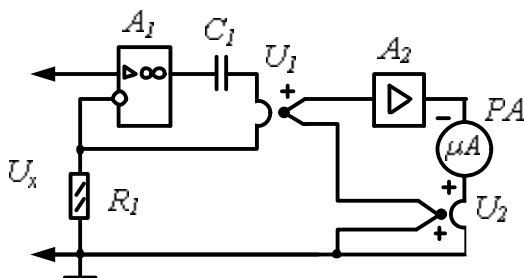


Рис. 3.10. Принцип действия милливольтметра ВЗ-48

Доверять показаниям подавляющего большинства вольтметров можно лишь, измеряя чисто синусоидальное напряжение, частота которого лежит в допустимых для используемого прибора пределах. В любом случае, прежде чем приступать к измерениям, нужно хорошо обдумать, что именно необходимо измерить и что на самом

деле покажет ваш вольтметр. Все, сказанное выше, в полной мере относится и к измерителям тока.

Микросхема AD736 фирмы *Analog Devices* является точным монолитным преобразователем переменного напряжения в эффективное значение с низким потреблением. При производстве микросхемы проводится лазерная подгонка, обеспечивающая базовую точность $\pm(0,3 \% + 0,3 \text{ мВ})$ при синусоидальном входном сигнале. Микросхема также обеспечивает высокую точность для различных форм входного сигнала, включая импульсные последовательности произвольной скважности и выходное напряжение тиристорных регуляторов с фазовым управлением. Относительно невысокая стоимость и малые размеры позволяют использовать эту микросхему для конструирования общедоступных мультиметров и модернизации существующих измерительных приборов.

Эта микросхема определяет эффективное значение как переменного, так и постоянного напряжения или постоянного с любой амплитудой наложенных пульсаций. При необходимости, однако, можно измерять эффективное значение только переменной составляющей, добавив всего один конденсатор. Гарантируется относительная ошибка не более 2 % от измеряемой величины.

Микросхема имеет выходной буферный усилитель, что обеспечивает большую гибкость при ее использовании. Она потребляет ток не более 200 мкА и оптимизирована для применения в портативных мультиметрах.

Возможны два варианта подачи входного сигнала на микросхему. Высокоомный вход имеет входное сопротивление более 10^{12} Ом, низкоомный – 8 кОм, однако низкоомный вход позволяет подавать входное напряжение большей амплитуды. Эти два входа могут использоваться

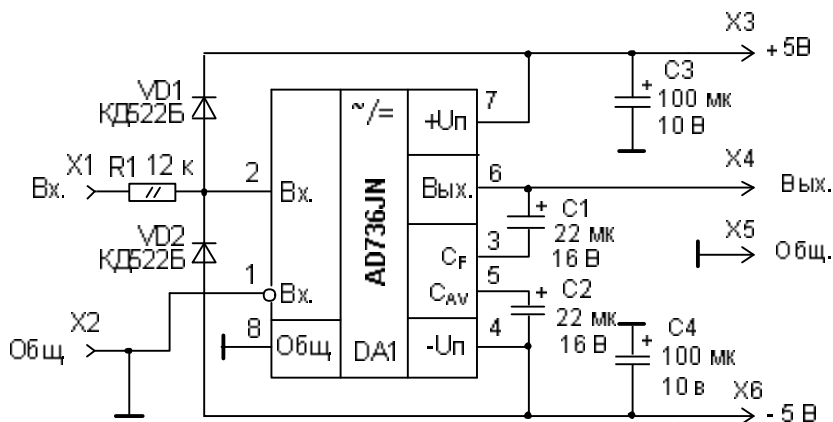


Рис. 3.11. Преобразователь напряжения любой формы в его эффективное значение

для дифференциальной подачи сигнала. На рис. 3.11 приведена практическая схема преобразования входного напряжения любой формы в его эффективное значение.

Контрольные вопросы

1. Какие измерительные механизмы могут быть использованы для измерения постоянных токов и напряжений?
2. Какое влияние оказывает изменение температуры окружающей среды на работу магнитоэлектрических вольтметров и амперметров?
3. Назовите рабочие диапазоны измерения токов и напряжений амперметров и вольтметров магнитоэлектрической, электромагнитной, электро- и ферродинамической систем.
4. Как выполняется измерение больших постоянных токов и напряжений?
5. Расскажите про особенности измерения переменного тока и напряжения с использованием приборов электромеханической, электро- и ферродинамической систем.
6. Назовите особенности использования прибора магнитоэлектрической системы для измерения переменных токов и напряжений.

7. Приведите основные схемы выпрямления, используемые в приборах выпрямительной системы, дайте их сравнительную оценку.
8. Чем вызваны методические погрешности при проведении измерений токов и напряжений амперметрами и вольтметрами?
9. Перечислите основные формы переменных электрических сигналов.
10. Назовите основные параметры, используемые для оценки переменных токов и напряжений. Дайте определение каждому параметру.
11. Что понимают под истинным эффективным значением тока и напряжения произвольной формы?

4. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

4.1. Общие сведения

Сопротивление, емкость и индуктивность относятся к основным параметрам электрических цепей, с измерением которых часто приходится встречаться на практике. Известно много методов их измерения, а приборостроительная промышленность выпускает для этой цели средства измерения широкой номенклатуры. Выбор того или иного метода измерения и измерительной аппаратуры зависит от вида измеряемого параметра, его значения, требуемой точности измерения, особенностей объекта измерения и т. п. Например, измерение сопротивлений твердых проводников, как правило, производится на постоянном токе, поскольку прибор для измерений в этом случае проще по конструкции и дешевле, чем аналогичный прибор для измерений на переменном токе. Однако измерение в средах, имеющих высокую влажность, или сопротивлений заземлений производится только на переменном токе, так как результат измерения на постоянном токе будет содержать большие погрешности из-за влияния электрохимических процессов.

4.2. Основные методы и средства измерения сопротивления электрической цепи постоянному току

Диапазон измеряемых на практике сопротивлений широк (от 10^{-8} до 10^{15} Ом), и его условно делят по значениям сопротивлений на малые (менее 10 Ом), средние (от 10 до 10^6 Ом) и большие (свыше 10^6 Ом), в каждой из которых измерение сопротивлений имеет свои особенности.

Сопротивление – параметр, проявляющийся только при прохождении в цепи электрического тока, поэтому измерения проводятся в работающем устройстве или используется измерительный прибор с собственным источником тока. Необходимо позаботиться о том, чтобы полученная электрическая величина правильно отражала только измеряемое сопротивление и не содержала излишней информации, которая воспринимается как погрешность измерения. Рассмотрим с этой точки зрения особенности измерения малых и больших сопротивлений.

При измерении малых сопротивлений, например обмоток трансформаторов или коротких проводов, через сопротивление пропускается ток, а возникшее на этом сопротивлении падение напряжения измеряется. На рис. 4.1 показана схема соединений при измерении сопротивления R_x короткого проводника. Последний подключается к источнику тока I посредством двух соединительных проводников с собственным сопротивлением R_n . В местах соединения этих проводников с измеряемым сопротивлением образуются переходные сопротивления контактов R_k . Значение R_n зависит от материала соединительного проводника, его длины и сечения, значение R_k – от площади соприкасающихся частей, их чистоты

и силы сжатия. Таким образом, числовые значения R_{π} и R_{κ} зависят от многих причин и определить их заранее трудно, но им можно дать примерную оценку. Если соединительные проводники выполнены коротким медным проводом с сечением в несколько квадратных миллиметров, а контактные сопротивления имеют чистую и хорошо сжатую поверхность, то для приближенных оценок можно принять $2(R_{\pi} + R_{\kappa}) \approx 0,01$ Ом.

В качестве измеряемого напряжения в схеме рис. 4.1 можно использовать U_{11} , U_{22} или U_{33} . Если выбрано U_{11} , то результат измерения отражает полное сопротивление цепи между зажимами 1-1':

$$R_{11} = U_{11} / I = R_x + 2(R_{\pi} + R_{\kappa}).$$

Здесь второе слагаемое представляет собой погрешность, относительное значение которой δ в процентах равно:

$$\delta = \frac{R_{11} - R_x}{R_x} \cdot 100\% = 2 \frac{R_{\pi} + R_{\kappa}}{R_x} \cdot 100\%.$$

При измерении малых сопротивлений эта погрешность может быть большой. Например, если принять $2(R_{\pi} + R_{\kappa}) \approx 0,01$ Ом, а $R_x = 0,1$ Ом, то $\delta \approx 10\%$. Погрешность δ уменьшится, если в качестве измеряемого напряжения выбрать U_{22} :

$$R_{22} = U_{22} / I = R_x + 2R_{\kappa}.$$

Здесь сопротивление подводящих проводов исключается из результата измерения, но остается влияние R_{κ} .

Результат измерения будет полностью свободен от влияния R_{π} и R_{κ} , если в качестве измеряемого напряжения выбрать U_{33} .

Схему включения R_x в таком случае называют четырехзажимной: первая пара зажимов 2 – 2' предназначена для подвода тока и называется токовыми зажимами, вторая пара зажимов 3 – 3' – для съема напряжения с измеряемого сопротивления и называется потенциальными зажимами.

Применение токовых и потенциальных зажимов при измерении малых сопротивлений является основным приемом для устранения влияния

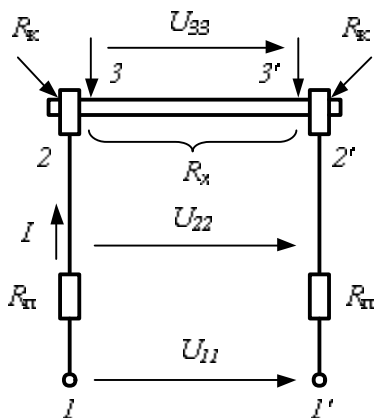


Рис. 4.1. Схема соединений при измерении сопротивления короткого проводника

соединительных проводов и переходных сопротивлений на результат измерения.

При измерении больших сопротивлений, например, сопротивлений изоляторов, поступают так: к объекту прикладывают напряжение, а возникший ток измеряют и по нему судят о значении измеряемого сопротивления.

При испытании диэлектриков следует иметь в виду, что их электрическое сопротивление зависит от многих условий – окружающей температуры, влажности, утечек по грязной поверхности, значения испытательного напряжения, продолжительности его действия и т. д.

Измерение сопротивления электрической цепи постоянному току на практике производится наиболее часто методом амперметра и вольтметра, логометрическим или мостовым методом.

Метод амперметра и вольтметра. Этот метод основан на раздельном измерении тока I в цепи измеряемого сопротивления R_x и напряжения U на его зажимах и последующем вычислении значения R_x по показаниям измерительных приборов:

$$R_x = U / I.$$

Обычно ток I измеряют амперметром, а напряжение U – вольтметром, этим объясняется название метода. При измерении высокоомных сопротивлений, например сопротивления изоляции, ток I мал и его измеряют миллиамперметром, микроамперметром или гальванометром. При измерении низкоомных сопротивлений, например куска провода, оказывается малым значение U и для его измерения применяют милливольтметры, микровольтметры или гальванометры. Однако во всех этих случаях метод измерения сохраняет свое наименование – амперметра и вольтметра. Возможные схемы включения приборов показаны на рис. 4.2, а, б.

Достоинство метода заключается в простоте его реализации, недостаток – в сравнительно невысокой точности результата измерения, которая ограничена классом точности применяемых измерительных приборов и методической погрешностью. Последняя обусловлена влиянием мощности, потребляемой измерительными приборами в процессе измерения, другими словами – конечным значением собственных сопротивлений амперметра R_A и вольтметра R_V .

Выразим методическую погрешность через параметры схемы.

В схеме рис. 4.2, а вольтметр показывает значение напряжения на зажимах R_x , а амперметр – сумму токов $I_V + I$. Следовательно, результат измерения R , вычисленный по показаниям приборов, будет отличаться от R_x :

$$R = \frac{U}{I + I_V} = \frac{U}{U / R_x + U / R_V} = \frac{R_x}{1 + R_x / R_V}.$$

Относительная погрешность измерения составит:

$$\delta = \frac{R - R_x}{R_x} = -\frac{R_x / R_V}{1 + R_x / R_V} \approx -\frac{R_x}{R_V}.$$

Здесь приближенное равенство справедливо, так как при правильной организации эксперимента предполагается выполнение условия $R_V \gg R_x$.

В схеме рис. 4.2, б амперметр показывает значение тока в цепи с R_x , а вольтметр – сумму падений напряжений на R_x и амперметре R_A . Учитывая это, можно по показаниям приборов вычислить результат измерения:

$$\frac{U + U_A}{I_A} = \frac{I_A R_x + I_A R_A}{I_A} = R_x + R_A.$$

Относительная погрешность измерения в данном случае равна:

$$\delta = \frac{R - R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x}.$$

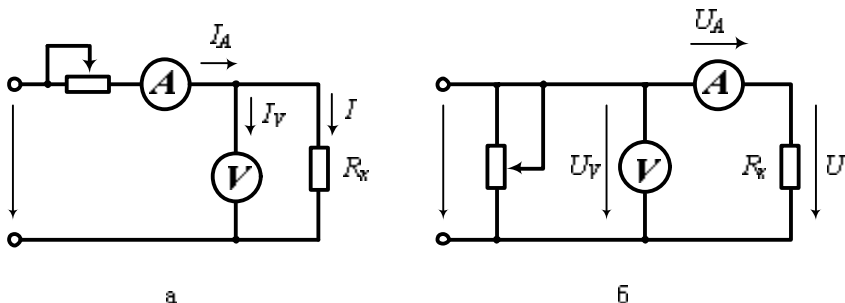


Рис. 4.2. Схемы для измерений малых (а) и больших (б) сопротивлений методом амперметра и вольтметра

Из полученных выражений для относительных погрешностей видно, что в схеме рис. 4.2, а на методическую погрешность результата измерения оказывает влияние только сопротивление R_V . Для снижения этой погрешности необходимо обеспечить условие $R_V \gg R_x$. В схеме рис. 4.2, б на методическую погрешность результата измерения оказывает влияние только R_A ; снижение этой погрешности достигается выполнением условия $R_x \gg R_A$. Таким образом, при практическом использовании данного метода можно рекомендовать правило: измерение малых сопротивлений следует производить по схеме рис. 4.2, а; при измерении больших сопротивлений предпочтение следует отдавать схеме рис. 4.2, б.

Методическую погрешность результата измерения можно исключить путем введения соответствующих поправок, но для этого необходи-

мо знать значения R_A и R_V . Если они известны, то из результата измерения по схеме рис. 4.2, б следует вычесть значение R_A ; в схеме рис. 4.2, а результат измерения отражает параллельное соединение сопротивлений R_x и R_V , поэтому значение R_x вычисляется по формуле

$$R_x = \frac{R}{1 - R/R_V}.$$

Если при данном методе применить источник питания с заранее известным напряжением, то необходимость измерения напряжения вольтметром отпадает, а шкалу амперметра можно сразу отградуировать в значениях измеряемого сопротивления. На этом принципе основано действие

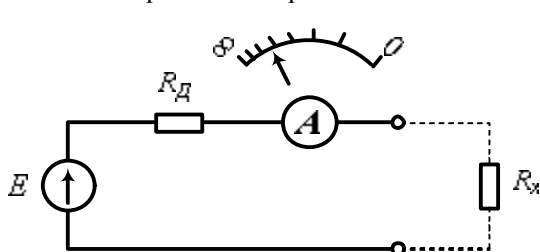


Рис. 4.3. Принципиальная схема омметра с последовательным включением измеряемого сопротивления

многих моделей выпускаемых промышленностью омметров непосредственной оценки. Упрощенная принципиальная схема такого омметра показана на рис. 4.3. Схема содержит источник ЭДС E , добавочный резистор R_d и амперметр (обычно микроамперметр) A . При подключении к зажимам схемы измеряемого сопротивления R_x в цепи возникает ток I , под действием которого подвижная часть амперметра поворачивается на угол α , а его указатель отклоняется на a делений шкалы:

$$a = \frac{E}{C_I} \frac{1}{R_d + R_A + R_x},$$

где C_I – цена деления (постоянная) амперметра; R_A – сопротивление амперметра.

Как видно из этой формулы, шкала омметра нелинейная, и стабильность градуировочной характеристики требует обеспечения стабильности всех величин, входящих в уравнение. Между тем источник питания в такого рода приборах обычно реализуется в виде сухого гальванического элемента, ЭДС которого падает по мере его разряда. Ввести поправку на изменение E , как видно из уравнения, можно путем соответствующей регулировки C_I или R_d . В некоторых омметрах C_I регулируется путем изменения индукции в зазоре магнитной системы амперметра с помощью магнитного шунта.

В этом случае поддерживается постоянство отношения E / C_I и градуировочная характеристика прибора сохраняет свое значение независимо от значения E . Регулировка C_I производится так: зажимы прибора, к которым подключается R_x , замыкаются накоротко ($R_x=0$) и регулировкой положения магнитного шунта добиваются установки указателя амперметра на нулевую отметку шкалы; последняя расположена на крайней правой точке шкалы. На этом регулировка заканчивается, и прибор готов к измерению сопротивлений.

В комбинированных приборах ампервольтметрах регулировка C_I недопустима, так как это приведет к нарушению градуировки прибора в режимах измерений токов и напряжений. Поэтому в таких приборах поправку на изменение ЭДС E вводят регулировкой сопротивления переменного добавочного резистора R_d . Процедура регулировки та же, что и в приборах с регулируемой магнитным шунтом магнитной индукцией в рабочем зазоре. В этом случае градуировочная характеристика прибора изменяется, что приводит к дополнительным методическим погрешностям. Однако параметры схемы выбираются так, чтобы указанная погрешность была небольшой.

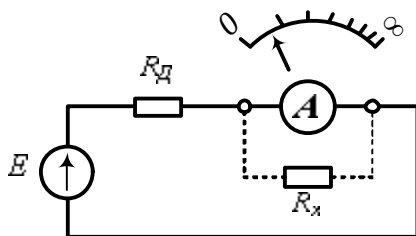


Рис. 4.4. Принципиальная схема омметра с параллельным включением измеряемого сопротивления

Возможен другой способ подключения измеряемого сопротивления – не последовательно с амперметром, а параллельно ему (рис. 4.4). Зависимость между R_x и углом отклонения подвижной части в данном случае также нелинейная, однако нулевая отметка на шкале расположена слева, а не справа, как это имеет место в предыдущем варианте. Такой способ подключения измеряемого сопротивления применяется при измерении малых сопротивлений,

так как позволяет ограничить потребляемый ток.

Электронный омметр может быть реализован на базе усилителя постоянного тока с большим коэффициентом усиления, например, на операционном усилителе (ОУ). Схема такого прибора показана на рис. 4.5. Его главное достоинство – линейность шкалы для отсчета результатов измерений. Операционный усилитель охвачен отрицательной обратной связью через измеряемый резистор R_x , питающее стабилизированное напряжение U_0 подано на вход усилителя через вспомогательный резистор R_I , а к выходу подключен вольтметр PV . При большом собствен-

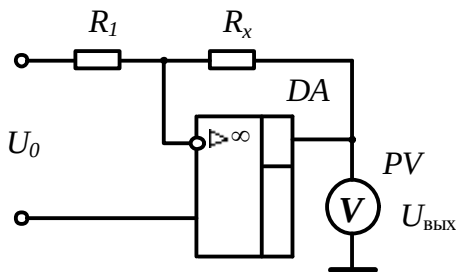


Рис. 4.5. Электронный омметр

чения R_x , причем она будет линейной в пределах изменения напряжения от 0 до $U_{\text{вых max}}$ – максимального напряжения на выходе ОУ.

Из формулы видно, что максимальное значение измеряемого сопротивления есть:

$$R_{x \text{ max}} = R_1 \frac{U_{\text{вых max}}}{U_0}.$$

Для изменения пределов измерений переключают значения сопротивления резистора R_1 или напряжения U_0 .

При измерении низкоомных сопротивлений можно в схеме поменять местами измеряемый и вспомогательный резисторы. Тогда выходное напряжение будет обратно пропорционально величине R_x :

$$U_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_1}{R_x}.$$

Следует заметить, что данный способ включения не позволяет измерять низкоомные сопротивления менее десятков Ом, поскольку внутреннее сопротивление источника опорного напряжения, которое составляет доли или единицы Ом, оказывается включенным последовательно с измеряемым сопротивлением и вносит существенную погрешность в измерения. Кроме того, в этом случае теряется основное преимущество прибора – линейность отсчета измеряемого сопротивления, а сдвиг нуля и входной ток усилителя могут вносить существенные ошибки.

Рассмотрим специальную схему для измерения малых сопротивлений, свободную от этих недостатков (рис. 4.6). Измеряемый резистор R_x вместе с резистором R_3 образует делитель напряжения на входе ОУ. Напряжение на выходе схемы в этом случае равно:

$$U_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_2}{R_1} \frac{R_x}{R_3 + R_x}.$$

венном коэффициенте усиления ОУ, низком выходном и высоком входном его сопротивлениях, выходное напряжение ОУ определяется как:

$$U_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_x}{R_l}.$$

Для заданных значений U_0 и R_1 , шкалу измерительного прибора можно проградуировать в единицах измерения сопротивления для отсчета зна-

Если выбрать $R_3 \gg R_x$, то выражение упростится и шкала прибора будет линейной относительно R_x :

$$U_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_2 R_x}{R_1 R_3}.$$

Электронный омметр не позволяет измерять реактивные сопротивления, так как включение измеряемой индуктивности или емкости в схему приводит к изменению фазовых соотношений в цепи обратной связи ОУ. В этом случае формулы станут неверными. Кроме того, ОУ может потерять устойчивость, и в схеме возникнут колебания.

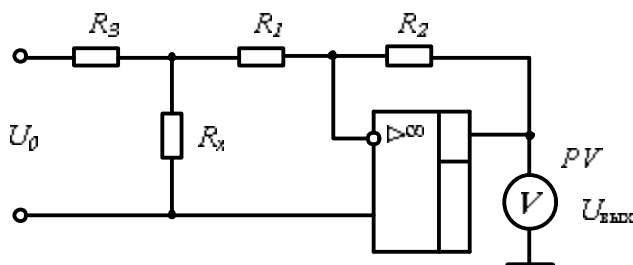


Рис. 4.6. Электронный омметр для измерения малых сопротивлений

Логометрический метод. Этот метод основан на измерении отношения двух токов I_1 и I_2 , один из которых протекает по цепи с измеряемым сопротивлением, а другой – по цепи, сопротивление которой известно. Оба тока создаются одним источником напряжения, поэтому нестабильность последнего практически не влияет на точность результата измерения. Принципиальная схема омметра на основе логометра представлена на рис. 4.7. Схема содержит измерительный механизм на основе логометра, магнитоэлектрической системы с двумя рамками, одна из которых при протекании тока создает отклоняющий, а другая – возвращающий момент. Измеряемое сопротивление может быть включено последовательно (рис. 4.7, а) или параллельно (рис. 4.7, б) относительно рамки измерительного механизма.

Последовательное включение применяется при измерении средних и больших сопротивлений, параллельное – при измерении малых сопротивлений. Рассмотрим работу омметра на примере схемы рис. 4.7, а. Если пренебречь сопротивлением обмоток рамок логометра, то угол поворота подвижной части α зависит только от отношения сопротивлений:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_x + R_0}{R_1 + R_0}\right),$$

где I_1 и I_2 - токи через рамки логометра; R_0 – сопротивление рамок логометра; R_1 – известное сопротивление; R_x – измеряемое сопротивление.

Сопротивлением резистора R_1 задается диапазон измеряемых омметром сопротивлений. Напряжение питания логометра влияет на чувствительность его измерительного механизма к изменению измеряемого сопротивления и не должно быть ниже определенного уровня. Обычно напряжение питания логометров устанавливают с некоторым запасом для того, чтобы его возможные колебания не влияли на точность результата измерения.

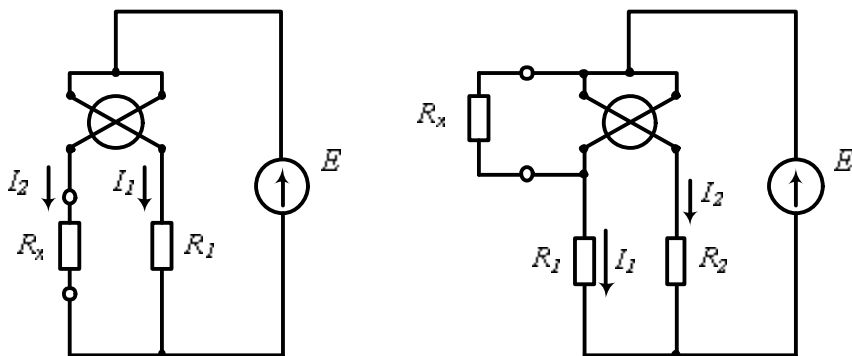


Рис. 4.7. Схемы омметров на основе логометра для измерения больших (а) и малых (б) сопротивлений

Выбор напряжения питания и способ его получения зависят от назначения омметра и диапазона измеряемых сопротивлений: при измерении малых и средних сопротивлений применяют сухие батареи, аккумуляторы или источники питания от промышленной сети, при измерении больших сопротивлений – специальные генераторы с напряжением 100, 500, 1000 В и более.

Логометрический метод применен в мегаомметрах ЭС0202/1Г и ЭС0202/2Г с внутренним электромеханическим генератором напряжения. Они применяются для измерения больших ($10^5 \dots 10^9$ Ом) электрических сопротивлений, для измерения сопротивления изоляции электрических проводов, кабелей, разъемов, трансформаторов, обмоток электрических машин и других устройств, а также для измерения поверхностных и объемных сопротивлений изоляционных материалов.

При измерении с помощью мегаомметра сопротивления электрической изоляции следует учитывать температуру и влажность окружающего воздуха, от значения, которых зависят возможные неконтролируемые утечки тока.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные параметры электрических цепей.
2. Перечислите основные методы измерения сопротивления электрической цепи постоянному току.
3. В чем заключаются особенности измерений больших и малых сопротивлений?
4. Назовите достоинства и недостатки метода амперметра-вольтметра.
5. Чем обусловлена методическая погрешность измерения сопротивления при использовании метода амперметра-вольтметра? Каким образом можно исключить методическую погрешность?
6. Расскажите про устройство и принцип работы электронного омметра.
7. Почему электронный омметр не позволяет измерять реактивные сопротивления электрической цепи?
8. В чем заключается логометрический метод измерения сопротивления? Приведите основные схемы омметров на основе логометра для измерения больших и малых сопротивлений.

5. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

Измерение мощности в цепях постоянного тока, активной и реактивной мощности в цепях переменного тока, однофазных и трехфазных, трехпроводных и четырехпроводных, производится в абсолютном большинстве случаев электродинамическими и ферродинамическими ваттметрами, выпускаемыми в соответствии с ГОСТ 8476–93.

В лабораторной практике применяются, главным образом, электродинамические ваттметры классов точности 0,1; 0,2; 0,3 и 0,5. В промышленности при технических измерениях широко применяются ферродинамические ваттметры классов точности 1,0; 1,5 и 2,5.

Шкалы ваттметров проградуированы в значениях измеряемой величины, т. е. в ваттах, киловаттах и т. д. Как электродинамические, так и ферродинамические ваттметры имеют равномерную шкалу.

Электродинамические ваттметры применяются для измерения мощности в цепях постоянного тока и цепях переменного тока частотой до нескольких тысяч герц.

Ферродинамические ваттметры применяются для измерения мощности в цепях переменного тока, главным образом, промышленной частоты.

5.1. Измерение мощности в цепях постоянного тока

Из выражения, определяющего мощность, выделяемую в какой-либо нагрузке R_H ,

$$P = UI,$$

нетрудно видеть, что мощность P может быть определена косвенно путем проведения двух прямых измерений: напряжения на нагрузке U с помощью вольтметра и тока в нагрузке I с помощью амперметра.

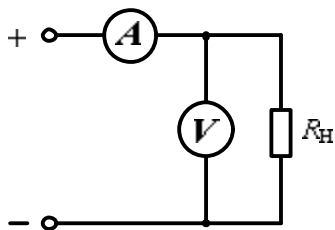


Рис. 5.1. Схемы включения приборов для измерения мощности в цепи постоянного тока

Наиболее целесообразно применение в этом случае вольтметра и амперметра магнитоэлектрической системы (рис. 5.1).

Несмотря на кажущуюся простоту и доступность, метод амперметра и вольтметра для измерения мощности P на практике применяется редко. Это объясняется тем, что названный метод требует одновременного отсчета показаний двух приборов и последующего вычисления P .

Наиболее просто и с необходимой точностью измерение мощности производится непосредственно с помощью электродинамического ваттметра. Включение такого ваттметра в цепь постоянного тока необходимо

осуществлять с соблюдением правильности соединения генераторных зажимов обмотки цепи тока и напряжения. На рис. 5.2 показано включение ваттметра PW для измерения мощности P .

Генераторный зажим токовой обмотки ваттметра всегда включается в сторону источника питания.

Генераторный зажим обмотки напряжения, в целях уменьшения методической погрешности, может быть включен так, как это показано на рис. 5.2, *а* или *б*.

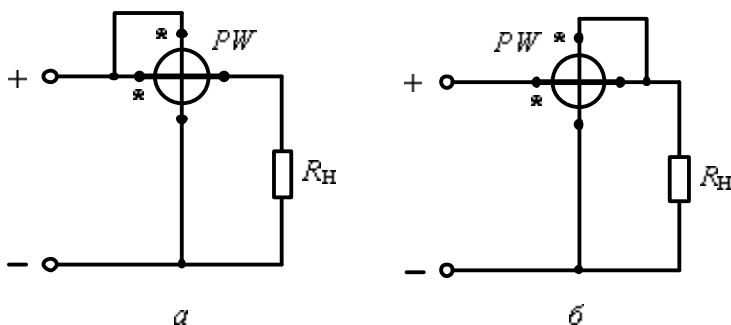


Рис. 5.2. Схемы включения ваттметра в цепь постоянного тока (знаком * отмечены генераторные зажимы): *а* — сопротивление нагрузки относительно большое; *б* — сопротивление нагрузки относительно малое

Схема рис. 5.2, *а* применяется при относительно большом значении сопротивления нагрузки R_H , а схема рис. 5.2, *б* — при относительно малом значении сопротивления нагрузки R_H , когда сопротивление нагрузки соизмеримо с сопротивлением токовой цепи. Значение сопротивления токовой цепи всегда указывается на циферблате прибора.

В большинстве случаев применения ваттметров сопротивление нагрузки R_H относительно велико (значение сопротивления нагрузки намного больше сопротивления последовательной токовой цепи ваттметра) и, следовательно, ваттметр необходимо включать по схеме рис. 5.2, *а*.

Несоблюдение правильности включения генераторного зажима любой из обмоток ваттметра приводит к изменению направления вращающего момента и выходу указателя ваттметра за пределы шкалы.

5.2. Измерение активной мощности в цепях переменного тока

Измерение активной мощности в однофазной цепи производится одноэлементными ваттметрами. Для измерения активной мощности в трехфазных цепях используются специальные двух- и трехэлементные ваттметры.

Расширение диапазонов измерения во всех случаях применения ваттметров в цепях переменного тока осуществляется с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Измерение мощности методом одного прибора. При использовании метода одного прибора измерение мощности осуществляется с помощью одноэлементного ваттметра. Метод применяется при измерении мощности в однофазных цепях и симметричных трехфазных цепях (комплексные сопротивления фаз одинаковы). И в том и в другом случае обмотка напряжения ваттметра включается на фазное напряжение, а обмотка тока

включается в рассечку провода какой-либо фазы.

На рис. 5.3 показано включение одноэлементного ваттметра в однофазную цепь переменного тока. Показание ваттметра определяется формулой

$$P_W = UI \cos \varphi,$$

где U и I – действующие значения напряжения и тока нагрузки; φ – угол между U и I .

На рис. 5.4, а, б показано включение одноэлементного ваттметра в симметричную трехфазную трехпроводную цепь.

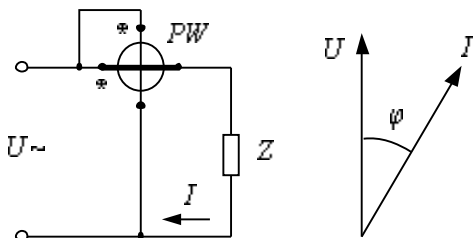


Рис. 5.3. Схема включения ваттметра в однофазную цепь переменного тока и векторная диаграмма

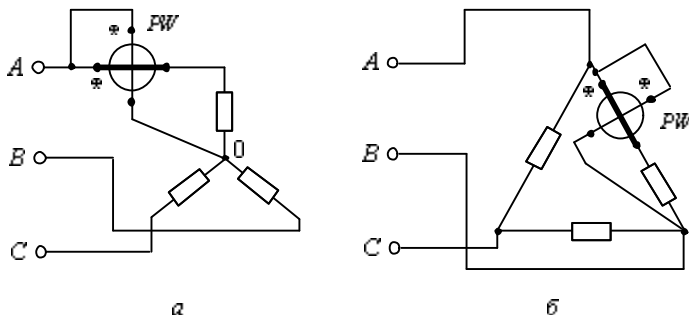


Рис. 5.4. Схемы включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь при полной симметрии; а – нагрузка соединена звездой и нулевая точка доступна; б – нагрузка соединена треугольником

На рис. 5.4, а нагрузка соединена звездой и нулевая точка доступна. На рис. 5.4, б нагрузка соединена треугольником. Если ваттметр невоз-

можно включить в фазу так, как это показано на рис. 5.4, б, или нулевая точка при соединении нагрузки звездой (рис. 5.4, а) недоступна, то в этом случае используется искусственная нулевая точка. Показание ваттметра в таком включении соответствует мощности одной фазы.

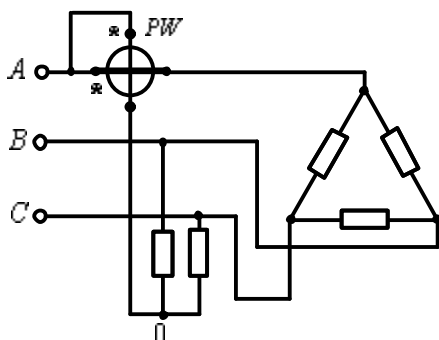


Рис. 5.5. Схема включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь с недоступной нулевой точкой при полной симметрии

Искусственная нулевая точка обычно создается с помощью двух резисторов (сопротивление каждого резистора равно сопротивлению цепи обмотки напряжения ваттметра) и сопротивления цепи обмотки напряжения ваттметра приведено либо на циферблате прибора, либо указывается в техническом паспорте на данный прибор.

Включение ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь по схеме с искусственной нулевой точкой показано на рис. 5.5.

Мощности одной фазы будет соответствовать и показание ваттметра в схеме на рис. 5.5. Действительно, фазное напряжение U_A , на которое включена обмотка напряжения ваттметра, равно $U_{AB}/\sqrt{3}$. Линейный ток I_A в токовой обмотке ваттметра $I_{AB}\sqrt{3}$. Следовательно, показание ваттметра

$$P_W = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} I_{AB} \sqrt{3} \cos(I_A, U_A) = U_{AB} I_{AB} \cos \varphi.$$

Для получения мощности всей трехфазной цепи во всех трех рассматриваемых случаях необходимо показание ваттметра утроить:

$$P = 3P_W.$$

Эти рассуждения справедливы лишь при измерении мощности в симметричных цепях, т. е. при симметрии напряжений и равенстве комплексных сопротивлений фаз.

Расширение диапазона измерения ваттметра по току в цепях с большими токами производится с помощью измерительного трансформатора тока. Диапазон измерения по напряжению расширяют с помощью измерительного трансформатора напряжения.

Для примера на рис. 5.6, *а* показано включение ваттметра для измерения мощности в однофазной цепи через измерительный трансформатор тока, а на рис. 5.6, *б* – через измерительный трансформатор тока и измерительный трансформатор напряжения.

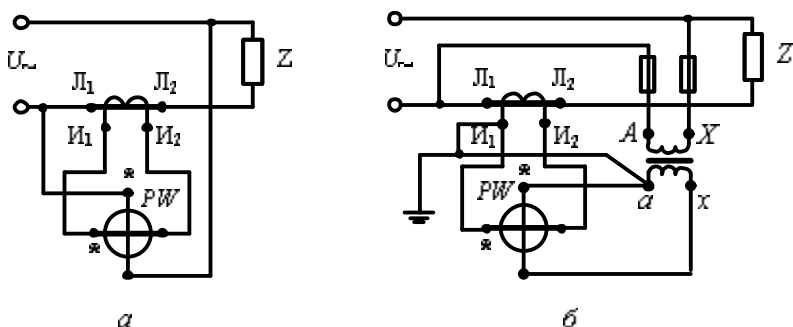


Рис. 5.6. Схемы включения ваттметра в однофазную цепь переменного тока: *а* — с использованием измерительного трансформатора тока; *б* — с использованием измерительных трансформаторов тока и напряжения

Следует обращать внимание на правильность подключения генераторных зажимов ваттметра и соответствующих зажимов измерительных трансформаторов. В схеме рис. 5.6, *а* значение измеряемой мощности P вычисляется умножением показания ваттметра P_W на номинальный коэффициент трансформации K_I применяемого измерительного трансформатора тока:

$$P = P_W K_I.$$

В схеме рис. 5.6, *б* значение измеряемой мощности определяется по формуле

$$P = P_W K_I K_U.$$

где K_U – номинальный коэффициент трансформации используемого измерительного трансформатора напряжения.

Измерение мощности методом двух приборов. Метод двух приборов используется при измерении мощности в трехфазной трехпроводной цепи с помощью двух одноэлементных ваттметров. Метод дает правильные результаты независимо от схемы соединения и характера нагрузки как при симметрии, так и при асимметрии токов и напряжений.

На рис. 5.7, *а* изображена схема включения двух одноэлементных ваттметров. Обычно токовая обмотка одного ваттметра, например P_{W1} включается в фазу *A*, а токовая обмотка другого ваттметра P_{W2} – в фазу *C*. Обмотки напряжения ваттметров включаются на линейные напряжения так, как это показано на рис. 5.7, *а*.

На рис. 5.7, б представлена векторная диаграмма цепи для частного случая – случая симметрии токов и напряжений. Показание ваттметра P_{W1} в этом случае равно

$$P_{W1} = U_{AB} I_A \cos(30^\circ + \varphi) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ + \varphi),$$

а показание ваттметра P_{W2} есть

$$P_{W2} = U_{CB} I_C \cos(30^\circ - \varphi) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ - \varphi).$$

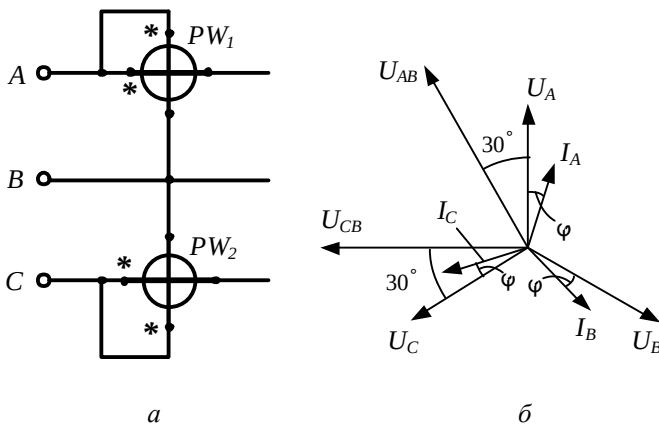


Рис. 5.7. Схема включения двух ваттметров в трехфазную трехпроводную цепь (а) и векторная диаграмма (б)

Учитывая, что при измерении мощности с использованием метода двух приборов общая мощность цепи равна алгебраической сумме показаний ваттметров, получаем:

$$P = P_{W1} + P_{W2} = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ + \varphi) + U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ - \varphi).$$

После несложных преобразований имеем:

$$P = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cdot 2 \cos 30^\circ \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi.$$

Таким образом, сумма показаний ваттметров P_{W1} и P_{W2} , есть не что иное, как мощность трехфазной цепи.

Отметим, что показания каждого ваттметра могут быть положительными или отрицательными в зависимости от значения угла φ и его знака. При $\varphi = 0$, т. е. при чисто активной нагрузке, показание ваттметра P_{W1} равно показанию ваттметра P_{W2} .

Двухэлементные ваттметры, обычно называемые трехфазными ваттметрами, представляют собой конструкцию из двух измерительных

механизмов одноэлементных ферродинамических ваттметров с одной общей подвижной частью, на которую действует суммарный вращающий момент.

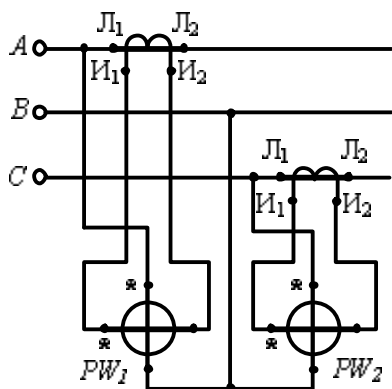


Рис. 5.8. Схема включения элементов двухэлементного ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь с использованием трансформаторов тока

мерении мощности в трехфазной четырехпроводной цепи (при этом используются три одноэлементных ваттметра). Так же, как и метод двух

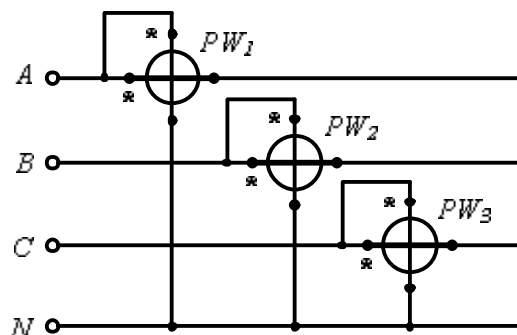


Рис. 5.9. Схема включения трех ваттметров в трехфазную четырехпроводную цепь

ваттметров по методу трех приборов в трехфазную четырехпроводную цепь, в этом случае каждый ваттметр измеряет мощность одной фазы:

Расширение диапазонов измерения трехфазных двухэлементных ваттметров так же, как и одноэлементных однофазных ваттметров, осуществляется с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения. На рис. 5.8 показано включение элементов двухэлементного трехфазного ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь через измерительные трансформаторы тока. В этом случае для получения мощности цепи показание ваттметра необходимо умножить на номинальный коэффициент трансформации K_I применяемых измерительных трансформаторов тока.

Измерение мощности методом трех приборов. Известно, что метод трех приборов применяется при измерении мощности, метод трех приборов дает правильные результаты независимо от схемы соединения и характера нагрузки, как при симметрии, так и при асимметрии токов и напряжений. По схеме, реализующей метод трех приборов, включаются также элементы трехэлементных трехфазных ваттметров.

На рис. 5.9 приведена схема включения трех одноэлементных ватт-

$$P_{W1} = P_A = U_A I_A \cos \varphi_A; P_{W2} = P_B = U_B I_B \cos \varphi_B;$$

$$P_{W3} = P_C = U_C I_C \cos \varphi_C,$$

где U_A, U_B, U_C – фазные напряжения; I_A, I_B и I_C – фазные токи; φ_A, φ_B и φ_C – фазовые сдвиги между соответствующими фазными напряжениями и фазными токами.

Очевидно, что для нахождения мощности трехфазной четырехпроводной цепи необходимо взять алгебраическую сумму показаний всех ваттметров:

$$P = P_A + P_B + P_C = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}.$$

Конструктивная схема трехэлементного трехфазного ферродинамического ваттметра приведена на рис. 5.10.

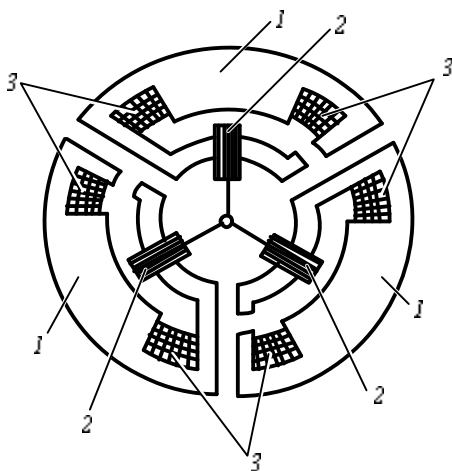


Рис. 5.10. Трехэлементный ферродинамический измерительный механизм: 1 – магнитопровод; 2 – подвижные рамки; 3 – неподвижные обмотки

Каждый элемент содержит выполненный из магнитомягкого материала шихтованный магнитопровод с неподвижной токовой обмоткой 3. Подвижные рамки элементов 2 жестко укреплены на одной оси. Таким образом, на подвижную часть трехфазного трехэлементного ваттметра действует арифметическая сумма моментов всех трех элементов. Непосредственное включение элементов ваттметра в трехфазную четырехпроводную цепь осуществляется по схеме, изображенной на рис. 5.9.

Расширение диапазонов измерения трехэлементных трехфазных ватт-

метров осуществляется так же, как и двухэлементных ваттметров, – с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения.

5.3. Измерение реактивной мощности и энергии в однофазной и трехфазной цепях

Несмотря то, что реактивная мощность не определяет ни совершаемой работы, ни передаваемой энергии за единицу времени, измерение ее (и энергии) имеет большое значение. Это объясняется тем, что наличие

реактивной мощности приводит к дополнительным потерям электрической энергии в линиях передачи, трансформаторах и генераторах. Как известно, под реактивной мощностью понимается следующее выражение:

$$Q = UI \sin \varphi .$$

Реактивная мощность однофазной цепи может быть измерена ваттметром.

Электродинамический или ферродинамический ваттметр, специально предназначенный для измерений реактивной мощности (реактивный ваттметр), применяется преимущественно для лабораторных измерений и для проверки реактивных индукционных счетчиков. Отличие реактивного ваттметра от обычного состоит в том, что он имеет усложненную схему параллельной цепи с целью получения сдвига по фазе $\gamma = 90^\circ$ между векторами тока и напряжения этой цепи. Тогда угол отклонения подвижной части ваттметра будет пропорционален реактивной мощности.

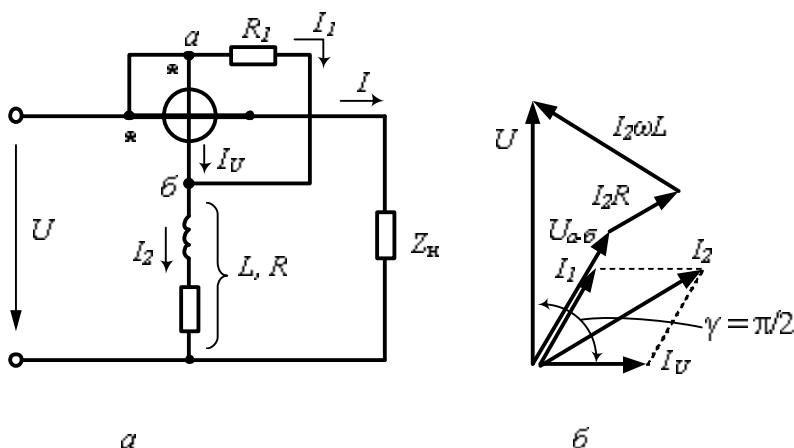


Рис. 5.11. Схема реактивного ваттметра (а) и векторная диаграмма (б)

Параллельная цепь ваттметра (рис. 5.11, а) состоит из подвижной катушки, шунтированной резистором с активным сопротивлением R_1 и катушки индуктивности L . Вектор тока I_U (рис. 5.11, б) отстает от вектора напряжения U_{ab} , а вектор тока I_1 в резисторе R_1 совпадает по фазе с U_{ab} . Подбором параметров схемы получают угол сдвига между векторами тока I_U и напряжения U , равный 90° .

Реактивную мощность трехфазной сети можно представить как сумму реактивных мощностей отдельных фаз, т. е.

$$Q = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C .$$

При полной симметрии системы реактивная мощность

$$Q = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi .$$

Измерить реактивную мощность (энергию) трехфазной сети можно различными способами: при помощи обычных ваттметров (счетчиков), но включаемых по специальным схемам, и при помощи реактивных ваттметров (счетчиков).

При полной симметрии трехфазной сети реактивную мощность можно измерить одним ваттметром, включенным по схеме рис. 5.12, а.

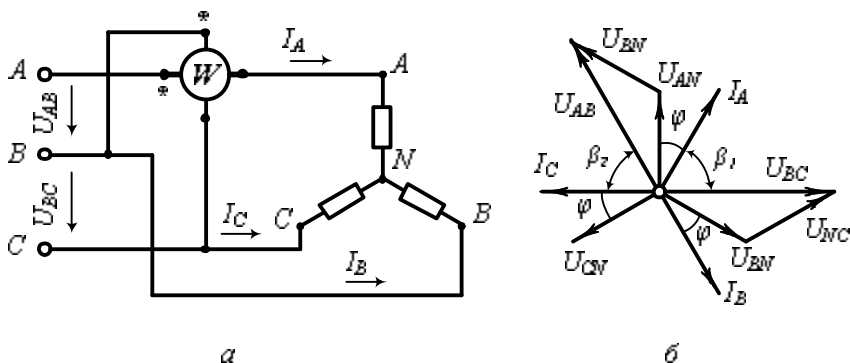


Рис. 5.12. Схема включения ваттметра (а) для измерения реактивной мощности в симметричной трехфазной сети и векторная диаграмма (б)

Показания ваттметра (с учетом векторной диаграммы рис. 5.12, б) будут равны:

$$P = U_{BC} I_A \cos \beta_1 = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(90^\circ - \varphi) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi .$$

Для определения реактивной мощности всей системы показания ваттметра необходимо умножить на $\sqrt{3}$. Так как даже при незначительной асимметрии схема с одним ваттметром дает большие погрешности, то она редко применяется.

Лучшие результаты дает измерение реактивной мощности двумя ваттметрами (рис. 5.13). Сумма показаний ваттметров (рис. 5.13) будет

$$P_1 + P_2 = U_{BC} I_A \cos \beta_1 + U_{AB} I_C \cos \beta_2 .$$

Анализ работы схемы при асимметричной нагрузке достаточно сложен, поэтому ограничимся частным случаем. Предположим, что углы $\beta_1 = \beta_2 = 90^\circ - \varphi$ (рис. 5.13, б) и система симметрична, тогда

$$P_1 + P_2 = 2U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi .$$

Для получения мощности трехфазной системы сумму показаний ваттметров нужно умножить на $\sqrt{3}/2$.

При включении нагрузки треугольником приборы (ваттметры или счётчики) включаются аналогично схемам рис. 5.12 и 5.13.

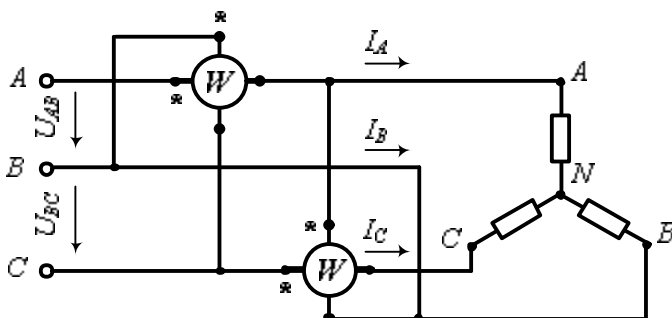


Рис. 5.13. Схема включения двух ваттметров при измерении реактивной мощности в асимметричной трехфазной цепи

При неравномерной нагрузке фаз, но симметричной системе напряжений (частичная асимметрия) реактивная мощность трехфазной сети может быть измерена двумя одинаковыми ваттметрами активной мощности с искусственной нулевой точкой (рис. 5.14, а).

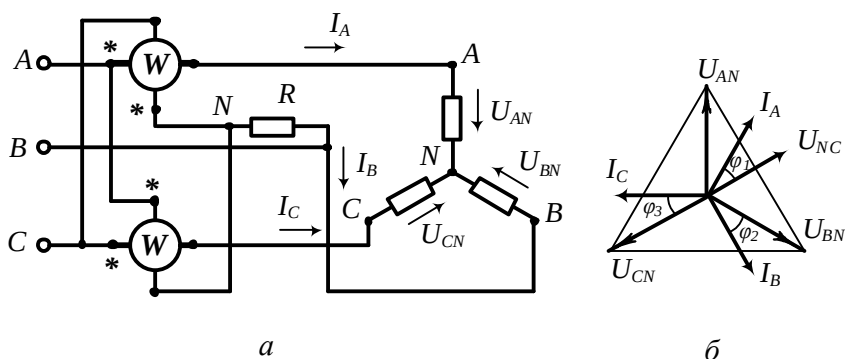


Рис. 5.14. Схема включения двух ваттметров (а) для измерения реактивной мощности в трехфазной цепи с частичной асимметрией и векторная диаграмма (б)

Для создания искусственной нулевой точки N используется резистор R , сопротивление которого равно сопротивлению параллельной цепи ваттметра.

Рассмотрим частный случай (равномерной нагрузки фаз), когда углы $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$. При этом, как видно из диаграммы рис. 5.14, б, сумма показаний ваттметров

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 &= I_A U_{NC} \cos(60^\circ - \varphi) + I_C U_{AN} \cos(120^\circ - \varphi) = \\ &= I_\phi U_\phi \left(\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi - \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) = \\ &= \sqrt{3} U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} Q_\phi. \end{aligned}$$

Таким образом, для получения реактивной мощности трехфазной сети нужно сумму показаний ваттметров умножить на $\sqrt{3}$.

Подробный анализ схемы рис. 5.14, а для случая неравномерной нагрузки фаз при симметричной системе напряжений приводит к такому же результату.

При измерении реактивной мощности и энергии в трехпроводной и четырехпроводной асимметричных сетях может быть применен один трехэлементный прибор или три прибора (ваттметра или счетчика) (рис. 5.15, а). Доказательство возможности измерения рассмотрим для частного случая.

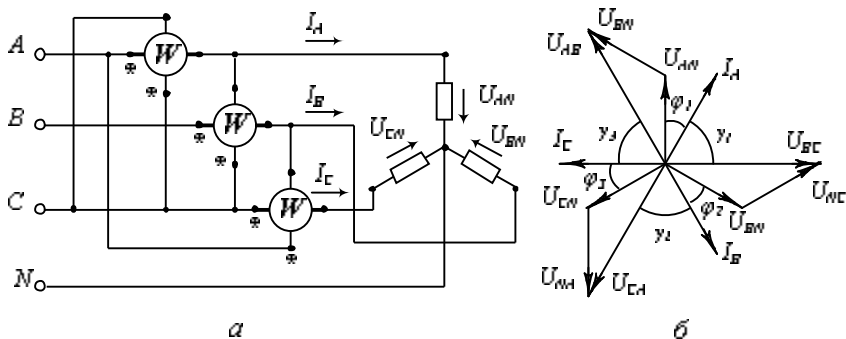


Рис. 5.15. Схема включения трех ваттметров (а) для измерения реактивной мощности (энергии) в трехфазной четырехпроводной цепи и векторная диаграмма (б)

Сумма показаний приборов с учетом чередования фаз при включении параллельных обмоток так, как показано на рис. 5.15, а, будет

$$P_1 + P_2 + P_3 = U_{BC} I_A \cos \gamma_1 + U_{CA} I_B \cos \gamma_2 + U_{AB} I_C \cos \gamma_3.$$

Из векторной диаграммы (рис. 5.16, б) найдем

$$\gamma_1 = 90^\circ - \varphi_1; \gamma_2 = 90^\circ - \varphi_2; \gamma_3 = 90^\circ - \varphi_3.$$

Так как $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\phi$, то

$$P_1 + P_2 + P_3 = U_{\text{л}} (I_A \sin \varphi_1 + I_B \sin \varphi_2 + I_C \sin \varphi_3).$$

Чтобы найти реактивную мощность системы, сумму показаний ваттметров необходимо разделить на $\sqrt{3}$.

На основе этого метода выпускаются реактивные счетчики, пригодные как для трехпроводных, так и четырехпроводных цепей трехфазного тока.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается метод косвенного измерения мощности?
2. Объясните правило включения генераторных зажимов токовой обмотки и обмотки напряжения ваттметра. В каких случаях генераторный зажим обмотки напряжения соединяют с выходом токовой обмотки?
3. Назовите способы увеличения пределов измерения ваттметров при измерении мощности в цепях переменного тока. Приведите схемы включения приборов.
4. В каких трехфазных цепях используется метод одного ваттметра для измерения активной и реактивной мощности? Приведите все возможные схемы включения прибора.
5. Объясните схему включения ваттметра с искусственной нейтральной точкой. Возможно ли использование этой схемы для точного измерения активной мощности несимметричной трехфазной нагрузки?
6. Поясните сущность метода двух ваттметров для измерения активной и реактивной мощности в трехпроводной трехфазной с несимметричной нагрузкой. Назовите достоинства и недостатки этого метода.
7. В процессе измерения активной мощности методом двух ваттметров показания приборов оказались одинаковыми. При какой нагрузке это возможно? Приведите график зависимостей показаний двух ваттметров от угла сдвига фаз тока и напряжения симметричной нагрузки.
8. Объясните устройство и принцип работы двух- и трехэлементного ваттметров. Приведите схемы включения этих приборов в электрическую цепь.
9. Каким образом выполняется измерение активной мощности в трехфазных четырех проводных цепях с несимметричной нагрузкой?
10. Расскажите про устройство, принцип действия и область применения реактивного ваттметра.
11. Назовите схемы включения ваттметров, которые обеспечивают приемлемую точность измерения реактивной мощности в трехфазных электрических цепях при частичной асимметрии.
12. Объясните сущность метода измерения реактивной мощности в трехпроводной и четырех проводной трехфазных цепях с использованием трех ваттметров.

6. ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ

6.1. Основные понятия

Цифровыми измерительными приборами (ЦИП) называются приборы, которые в процессе измерения осуществляют автоматическое преобразование непрерывной измеряемой величины в дискретную с последующей индикацией результата измерений на цифровом отсчетном устройстве.

Процесс преобразования аналоговой формы сигнала в цифровую называется аналого-цифровым преобразованием, а преобразователь, осуществляющий это преобразование, – *аналого-цифровым преобразователем* (АЦП).

В последние годы цифровые приборы получили большое распространение, особенно в качестве лабораторных вольтметров, амперметров, омметров, частотомеров и фазометров. По сравнению с аналоговыми приборами цифровые имеют такие преимущества, как высокая точность, широкий рабочий диапазон, высокое быстродействие, получение результатов измерения в удобной для считывания оператором форме, автоматического введения поправок для уменьшения систематических погрешностей, автоматической калибровки, автоматизации процесса измерения.

Недостатками цифровых приборов являются меньший диапазон рабочих температур и необходимость в источнике питания измерительных и регистрирующих устройств.

Обобщенная функциональная схема ЦИП показана на рис. 6.1. Измеряемая величина $x_{изм}$ подается на входное устройство ВУ, предназна-

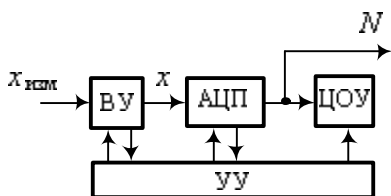


Рис. 6.1. Обобщенная структурная схема ЦИП

ЭВМ для дальнейшей обработки или хранения. Управляет работой ЦИП устройство управления УУ путем выработки определенной последовательности командных сигналов во все функциональные узлы ЦИП.

Аналого-цифровые преобразователи имеют важное самостоятельное значение. Они широко используются для связи первичных преобразователей электрических и неэлектрических величин с цифровыми вычислительными машинами, микропроцессорами и другими устройствами накопления и обработки результатов наблюдений. Интегральные микросхемы

АЦП производятся миллионными тиражами, что позволило снизить их цену и сделать доступными для производства недорогой высококачественной измерительной аппаратуры.

По виду измеряемых величин ЦИП подразделяются на:

- вольтметры постоянного и переменного тока;
- омметры и мосты постоянного и переменного тока;
- комбинированные приборы;
- измерители частоты и интервалов времени;
- специализированные ЦИП, предназначенные для измерения температуры, массы грузов, скоростей, времени срабатывания различных элементов и т. п.

Диапазон измеряемых посредством ЦИП величин обычно широкий и разбивается на ряд поддиапазонов. Выбор нужного поддиапазона в процессе измерения производится вручную или автоматически. Измерение на выбранном поддиапазоне всегда происходит автоматически.

6.2. Аналого-цифровые преобразователи и цифровые вольтметры

Аналого-цифровые преобразователи – устройства, которые принимают входные аналоговые сигналы и генерируют соответствующие им цифровые коды, пригодные для обработки микропроцессорами и другими цифровыми устройствами.

Принципиально не исключена возможность непосредственного преобразования различных физических величин в цифровую форму, однако эту задачу удастся решить лишь в редких случаях из-за сложности таких преобразователей. Поэтому в настоящее время наиболее рациональным признается способ преобразования различных по физической природе величин сначала в аналоговые электрические сигналы в виде тока или напряжения с амплитудой, пропорциональной измеряемой величине, а затем уже с помощью АЦП их переводят в цифровую форму.

В настоящее время известно большое число методов преобразования напряжение – код. Эти методы существенно отличаются друг от друга точностью, скоростью преобразования и сложностью аппаратной реализации. На рис. 6.2 представлена классификация АЦП по методам преобразования.

В основу классификации АЦП положен признак, указывающий на то, как во времени разворачивается процесс преобразования аналоговой величины в цифровую. В основе преобразования выборочных значений сигнала в цифровые эквиваленты лежат операции квантования и кодирования. Они могут осуществляться с помощью либо последовательной, либо параллельной, либо последовательно-параллельной процедур приближения цифрового эквивалента к преобразуемой величине.

Параллельный АЦП является самым быстрым. Например, восьмиразрядный преобразователь типа *MAX108* позволяет получить 1,5 млрд

отсчетов в секунду при времени задержки прохождения сигнала не более 2,2 нс. Недостатком этой схемы является малая разрядность.

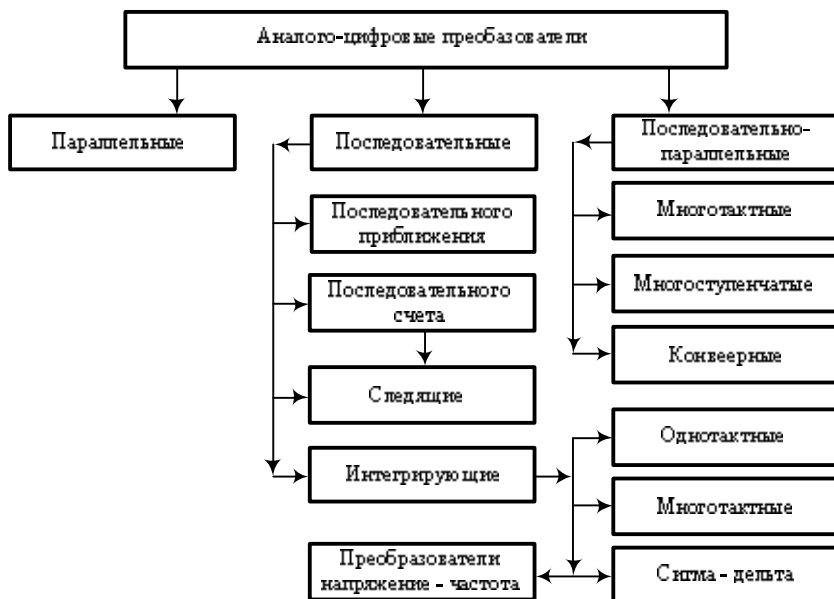


Рис. 6.2. Классификация АЦП

Последовательно-параллельные АЦП занимают промежуточное положение по разрешающей способности и быстродействию между параллельными АЦП и АЦП последовательного приближения.

Особенностью *АЦП последовательного счета* является небольшая частота дискретизации, достигающая всего лишь нескольких килогерц. Достоинством АЦП данного класса является сравнительная простота построения, определяемая последовательным характером выполнения процесса преобразования. В настоящее время такие АЦП не изготавливаются в виде отдельных интегральных микросхем, однако входят в состав микросхем для управления электродвигателями, например *ADMC330*. Недостатком последовательных АЦП является низкая помехоустойчивость результатов преобразования. Действительно, выборка мгновенного значения входного напряжения, обычно включает слагаемое в виде мгновенного значения помехи. В дальнейшем при цифровой обработке последо-

вательности выборок эта составляющая может быть подавлена, однако на это требуется время и дополнительные вычислительные ресурсы.

В АЦП *многотактного интегрирования*, входной сигнал интегрируется либо непрерывно, либо на определенном временном интервале, длительность которого обычно выбирается кратной периоду помехи. Это позволяет во многих случаях подавить помеху еще на этапе преобразования. Платой за это является пониженное быстродействие интегрирующих АЦП.

АЦП многотактного интегрирования были изобретены более 40 лет назад и сразу же стали основой для цифровых вольтметров высокой точности. Прорывом в этой области техники стала разработка в середине 70-х годов прошлого века Л. Эвансом и Д. Бингемом (США) АЦП двухтактного интегрирования *ICL7106* (отечественный аналог – *572ПВ2*), который и сегодня выпускается многими фирмами. Варианты этого АЦП являются «мозгом» современных цифровых мультиметров. Наибольшее распространение из время-импульсных методов, реализуемых в АЦП, нашли различные варианты *метода двойного интегрирования*, обеспечивающего измерение среднего (за интервал интегрирования) значения U_x . Распространение этого метода обусловлено его очевидными достоинствами: возможностью подавления напряжения помех, получением высокой точности при относительной простоте схемы, возможностью полной реализации на интегральных микросхемах.

В АЦП двойного интегрирования преобразование U_x в пропорциональный ему временной интервал T_x осуществляется путем интегрирования сначала измеряемого U_x , а затем опорного $U_{оп}$ напряжений. В первом такте в течение времени $T_и$ производится интегрирование входного напряжения U_x , в результате чего напряжение на выходе интегратора

$$U_1(t) = \frac{1}{RC} \int_0^{T_и} U_x dt = \frac{U_x}{RC} t ,$$

где RC – постоянная времени интегратора; t – независимая переменная величина (время).

В конце интервала интегрирования напряжение на выходе интегратора $U_1(T_и) = U_1 T_и / RC$.

В течение второго такта интегрируется опорное напряжение $U_{оп}$, имеющее противоположную по отношению к U_x полярность. Интегрирование опорного напряжения продолжается до тех пор, пока выходное напряжение интегратора снова не станет равным нулю. Поэтому в течение времени второго такта напряжение на выходе интегратора изменяется следующим образом:

$$U_2(t) = \frac{U_x}{RC} \int_0^{T_x} U_{\text{оп}} dt = \frac{U_x}{RC} T_{\text{и}} - \frac{U_{\text{оп}}}{RC} t,$$

а в конце этого периода

$$U_2(T_x) = U_x T_{\text{и}} / RC - U_{\text{оп}} T_x / RC,$$

откуда $T_x = U_x T_{\text{и}} / U_{\text{оп}}$. Преобразование временного интервала T_x в эквивалентное число импульсов N_x осуществляется путем заполнения T_x импульсами генератора опорной частоты и подсчета их числа счетчиком: $N_x = U_x T_{\text{и}} f_{\text{оп}}$ ($f_{\text{оп}}$ – частота генератора опорной частоты).

Интервал интегрирования $T_{\text{и}}$ формируется обычно путем заполнения счетчика импульсами от генератора опорной частоты и равен в этом случае $T_{\text{и}} = N / f_{\text{оп}}$ (N – емкость счетчика), тогда $N_x = U_x N / U_{\text{оп}}$.

Из уравнения $T_x = F(U_x)$ видно, что временной интервал T_x , пропорциональный U_x , не зависит от постоянной времени интегратора RC , а зависит от значений $U_{\text{оп}}$ и $T_{\text{и}}$, которые могут поддерживаться постоянными с высокой точностью. В этом основное преимущество метода двойного интегрирования. Достоинством метода является также то, что значение N_x не зависит от начального напряжения интегратора и долговременной нестабильности $T_{\text{и}}$ и $U_{\text{оп}}$.

Структурная схема цифрового измерительного прибора с применением АЦП, основанного на методе двойного интегрирования, приведена на рис. 6.3, а временные диаграммы, поясняющие его работу, – на рис. 6.4. После запуска устройства управления (момент t_1) на счетчик и запоминающее устройство подается сигнал, устанавливающий их в исходное (нулевое) состояние. В момент t_2 с устройства управления подается сигнал, который ключ K_2 размыкает, а ключ K_1 , устанавливает в положение 1, когда на вход интегратора подается U_x , например U_1 . Ключ K_1 , находится в положении 1 в течение времени $T_{\text{и}}$, при этом напряжение на выходе интегратора $U_{\text{инт}}$ возрастает до значения U_1' (первый такт работы прибора). Интервал интегрирования $T_{\text{и}}$ формируется следующим образом. В момент t_2 на один из входов схемы И с устройства управления подается сигнал, по которому с выхода схемы И на вход счетчика подаются импульсы с генератора опорной частоты, подаваемые на второй вход схемы И. Счет этих импульсов идет до полного заполнения счетчика. На рис. 6.3 счетчик имеет четыре декады, следовательно, счет идет до 10^4 импульсов. После того как в счетчике зафиксировается 9999 импульсов, следующий (десяти тысячный) импульс возвращает его в исходное состояние и с последней декады на устройство управления подается сигнал переполнения, по которому ключ K_1 , устанавливается в положение 2.

В течение интервала $T_{\text{и}}$ состояние счетчика не переносится в запоминающее устройство и не индицируется на цифровом индикаторе.

Интервал интегрирования $T_{\text{инт}} = N T_0 = N / f_0$ (N – емкость счетчика) формируется числом импульсов генератора опорной частоты f_0 , и его постоянство определяется стабильностью генератора.

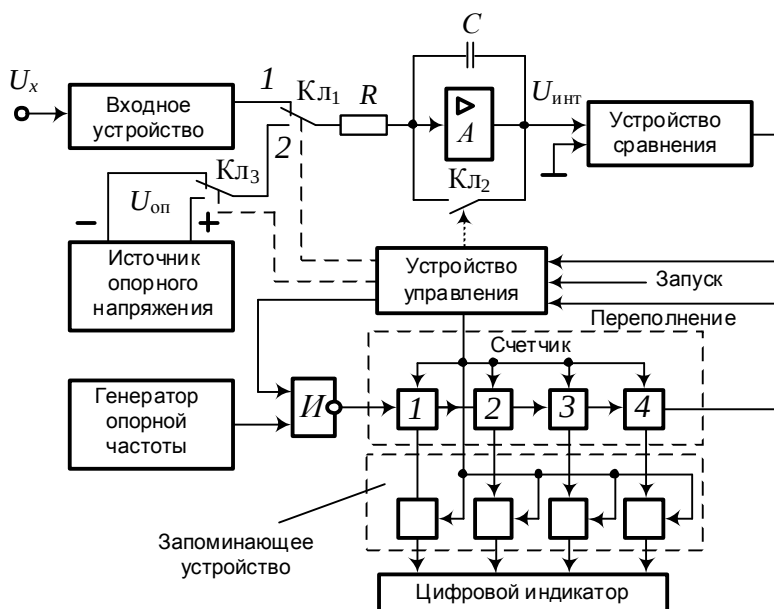


Рис. 6.3. Структурная схема ЦИП с АЦП двойного интегрирования

Когда ключ K_1 , переключится в положение 2 (момент t_3), на вход интегратора будет подаваться опорное напряжение $U_{\text{оп}}$ с полярностью, противоположной U_x (определяется положением ключа K_3). Начинается второй такт работы прибора, когда напряжение на выходе интегратора начинает уменьшаться от значения U_1' до нуля (момент t_4). Состояние $U_{\text{инт}} = 0$ определяет устройство сравнения (компаратор), которое в этот момент выдает импульс в устройство управления. Устройство управления снимает сигнал со схемы $И$, и импульсы с генератора опорной частоты на счетчик не подаются. Число импульсов N_x , подсчитанное счетчиком в интервале $T_x = t_4 - t_3$, пропорционально U_x . Оно фиксируется в запоминающем устройстве и индицируется на цифровом индикаторе до прихода следующего импульса запуска.

На рис. 6.4 показано, как изменяются напряжение на выходе интегратора и временной интервал T_x для различных значений U_x . Угол наклона графика интегрирования α при разряде постоянен, так как напряжение на входе и постоянная времени интегратора в процессе измерения

не меняются, это и дает возможность получить время разряда интегратора T_x , пропорциональное U_x .

Цифровые вольтметры (ЦВ) имеют низкий порог реагирования обычно (10 или 1 мкВ), поэтому очень важно, чтобы результат измерения мало зависел от помех и наводок во входной цепи ЦВ, уровень которых часто значительно больше порога реагирования ЦВ.

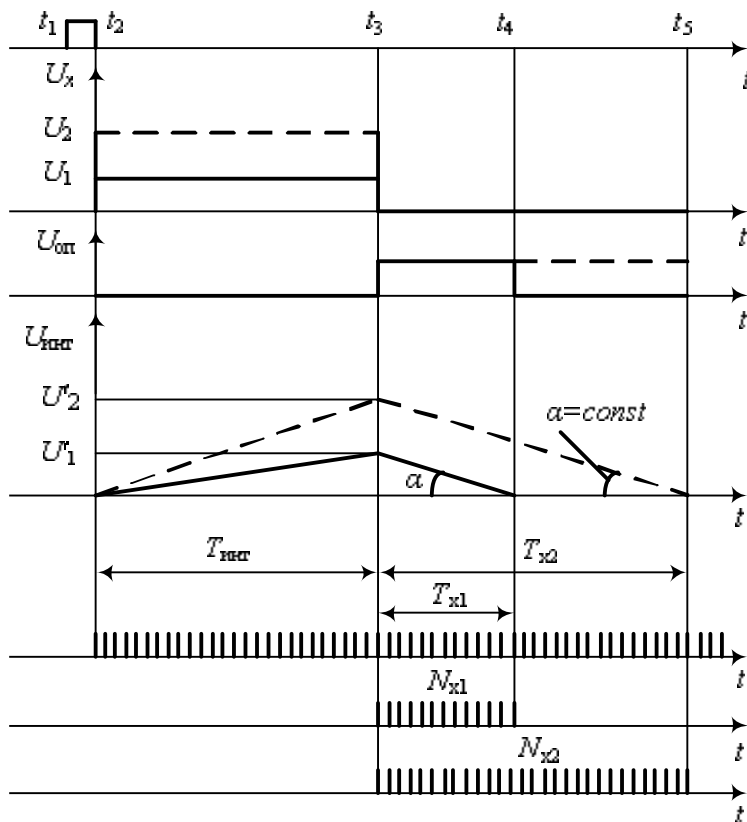


Рис. 6.4. Временные диаграммы работы АЦП двойного интегрирования

В ЦВ на основе двухтактного интегрирования эффективное подавление помехи нормального вида достигается путем выбора длительности первого такта интегрирования равным или кратным целому числу периодов помехи. В соответствии с принципами действия таких ЦВ результат измерения прямо пропорционален среднему значению измеряемого напряжения на первом такте интегрирования, а среднее значение синусои-

дальной помехи за период равно нулю. Но частота сетевого напряжения не строго постоянна и может изменяться в пределах $50 \pm 0,5$ Гц. В ЦВ с постоянной длительностью интервала $\Gamma_{\text{инт}}$ (рис. 6.4) последнее обстоятельство накладывает ограничение на степень подавления помехи. В связи с этим в таких ЦВ также применяют входные фильтры для большего подавления помех.

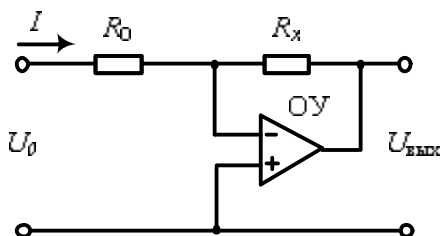


Рис. 6.5. Преобразователь сопротивления в напряжение

различных электрических величин в напряжение постоянного тока. Так, при измерении токов в качестве преобразователей применяются шунты, при измерении напряжений переменного тока – выпрямители на полупроводниковых диодах.



Рис. 6.6. Комбинированный переносный цифровой измерительный прибор

Комбинированные цифровые приборы позволяют измерять несколько электрических величин, например напряжений постоянного и переменного тока, сопротивления постоянному току, емкости, индуктивности в их различном сочетании. Как правило, основой комбинированного прибора является ЦВ постоянного тока интегрирующего типа; кроме него прибор содержит ряд преобразователей

Преобразование сопротивлений в напряжение обычно производится с помощью операционного усилителя. Одна из возможных схем такого преобразователя показана на рис. 6.5. Измеряемое сопротивление R_x включено в цепь ООС, по напряжению операционного усилителя ОУ с большим коэффициентом усиления. К входу усилителя через резистор R_0 подключен источник постоянного напряжения U_0 . В нормальном режиме работы разность потенциалов на входе усилителя близка к нулю, иначе ОУ перейдет в режим отсечки или насыщения. Это дает основание считать, что ток $I = U_0/R_0$. Если

ток I будет протекать через R_x и выходное напряжение будет равно: $U_{\text{вых}} = R_x I = R_x U_0/R_0$.

где U_0 и R_0 – величины постоянные и стабильные, поэтому преобразователь является линейным преобразователем сопротивления в напряжение.

Современные комбинированные приборы имеют малые вес и габариты при высокой степени автономности, что делает их чрезвычайно удобными на практике (рис. 6.6).

Контрольные вопросы

1. Назовите достоинства цифровых измерительных приборов перед аналоговыми приборами.

2. Приведите обобщенную функциональную схему цифрового измерительного прибора. Объясните назначение основных элементов схемы.

3. Расскажите про назначение аналого-цифровых преобразователей. Дайте классификацию АЦП по методам преобразования аналогового сигнала в цифровой. Проведите сравнительную оценку АЦП последовательного и параллельного действия.

4. Поясните принцип работы цифрового измерительного прибора, построенного на базе АЦП двойного интегрирования.

5. Каким образом выбираются длительности первого и второго такта в АЦП двойного интегрирования?

6. Объясните принцип измерения сопротивления с помощью комбинированного цифрового измерительного прибора.

7. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Электронно-лучевой осциллограф – это прибор для визуального наблюдения электрических процессов, представленных в форме напряжения, а также измерения различных параметров сигналов, определяющих их мгновенные значения и временные характеристики. Кроме того, осциллограф может быть использован для измерения фазового сдвига между двумя синусоидальными напряжениями, частоты и составляющих комплексного сопротивления.

Электронно-лучевые осциллографы строятся на основе электронно-лучевых трубок. Отклонение электронного луча осуществляется непосредственно электрическим сигналом и является практически безынерционным. Исследуемый процесс отображается на люминесцентном экране и может быть зарегистрирован фотографическими средствами.

Основным узлом электронно-лучевого осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), представляющая собой стеклянную вакуумированную колбу, внутри которой имеются источник электронов, система формирования узкого электронного луча, отклоняющие пластины и люминесцентный экран (рис. 7.1).

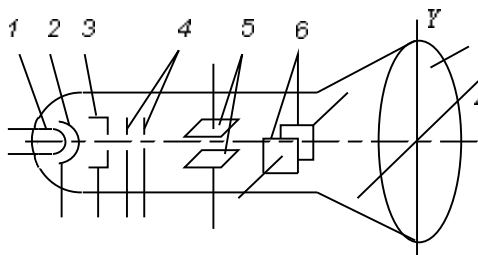


Рис. 7.1. Электронно-лучевая трубка

Источником электронов является оксидный катод 2 с подогревателем 1. Число электронов, из которых затем формируется узкий электронный пучок, зависит от напряжения между катодом 2 и модулятором 3. При изменении этого напряжения меняется интенсивность электронного пучка, выходящего за

пределы модулятора. Дальнейшее формирование пучка происходит под воздействием напряжений, приложенных к двум анодам 4, один из которых является ускоряющим, а другой – фокусирующим. Часть ЭЛТ, включающая в себя катод, модулятор и два анода, называется электронной пушкой. Назначение электронной пушки – сформировать узкий электронный пучок (луч) необходимой интенсивности. Этот пучок затем проходит между двумя парами взаимно перпендикулярных металлических отклоняющих пластин: вертикально отклоняющих 5 и горизонтально отклоняющих 6, а затем попадает на люминесцентный экран 7 ЭЛТ, образуя на нем яркое пятно. Если к отклоняющим пластинам приложить электрическое напряжение, то между ними будет существовать электрическое поле, которое приведет к горизонтальному (вдоль оси X) или вер-

тикальному (вдоль оси Y) отклонению электронного луча. Это отклонение прямо пропорционально напряжению, приложенному к пластинам: $h_x = S_x U_x$; $h_y = S_y U_y$, где h_x , h_y – отклонения вдоль осей X и Y ; S_x и S_y – чувствительности трубки, мм/В; U_x и U_y – напряжения на пластинах X и Y соответственно. Чувствительности S_x и S_y зависят от конструктивных особенностей трубки и составляют 0,2–0,5 мм/В, поэтому напряжение, подаваемое на пластины, должно составлять не менее 100 – 200 В, чтобы вызвать перемещение пятна на экране на 50 мм.

Основной функцией осциллографа является отображение формы исследуемого напряжения на экране. Требуемое отображение достигается

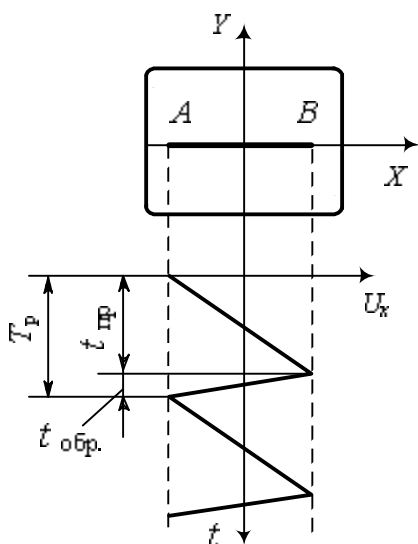


Рис. 7.2. Пилообразное напряжение на горизонтальных пластинах X

перемещением электронного луча в вертикальном и горизонтальном направлениях. Перемещение по вертикали происходит под влиянием исследуемого напряжения, приложенного к пластинам Y , а по горизонтали – приложенного к пластинам X напряжения пилообразной формы, называемого напряжением развертки. Последнее вырабатывается специальным генератором развертки. Рассмотрим сначала случай, когда напряжение на вертикально отклоняющих пластинах Y равно нулю, т. е. $U = 0$, а на горизонтально отклоняющих пластинах X имеется пилообразное напряжение (рис. 7.2).

Тогда перемещение электронного луча будет приводить к перемещению пятна на экране

от точки A к точке B за время t_{np} , и обратное перемещение за время $t_{обр}$. Таким образом, за время $T_p = t_{np} + t_{обр}$, называемое периодом развертки, луч осуществит свой прямой и обратный ход. Пилообразное напряжение формируется так, чтобы $t_{np} \gg t_{обр}$, т. е. $T_p \approx t_{np}$.

Из-за большой скорости и специального гашения запирающим напряжением обратный ход луча обычно не просматривается. Ввиду того, что во время прямого хода луча скорость пятна на экране постоянна, ось X можно рассматривать как ось времени t .

Если одновременно к вертикально отклоняющим пластинам Y приложить исследуемое напряжение, то положение луча в каждый момент времени будет однозначно соответствовать значению этого напряжения. На рис. 7.3 показано, как образуется изображение на экране ЭЛТ.

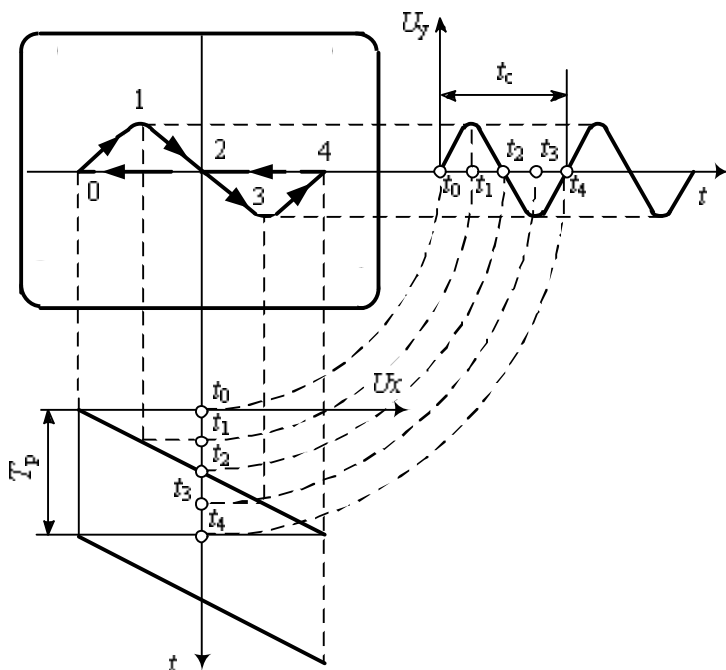


Рис. 7.3. Получение изображения на экране ЭЛТ.

Исследуемое напряжение с амплитудой U_c и периодом T_c подается на пластины Y , напряжение развертки с амплитудой U_p и периодом T_p – на пластины X . Если $T_p = T_c$, то каждому периоду развертки будет соответствовать период исследуемого напряжения и изображение на экране не будет изменяться со временем, оставаясь неподвижным. Это изображение можно построить по точкам, отмечая значения напряжений развертки и сигнала в заданные моменты времени и перенося их на экран. На рис. 7.3 это сделано для моментов времени t_0, t_1, t_2, t_3 и t_4 . Пятно на экране в эти моменты будет занимать положения 0, 1, 2, 3 и 4 соответственно. Полученное таким образом изображение (или его запись), показывающее, как изменяется исследуемое напряжение от времени, называется осциллограммой. Имея осциллограмму, можно определить многие параметры сигнала: амплитуду, частоту, период и др.

На практике напряжение развертки в течение прямого хода растет со временем не строго линейно. Это приводит к неравномерности масштаба по оси X , т. е. по временной оси. При этих условиях измерение временных интервалов будет сопровождаться ошибками. Поэтому нелинейность развертки нормируется и указывается в паспорте осциллографа наряду с другими нормируемыми параметрами.

Выше отмечалось, что при равенстве периодов развертки и исследуемого напряжения $T_p = T_c$ изображение на экране неподвижно. Оно будет неподвижным и в более общем случае $T_p = nT_c$, где n – целое число. При этом на осциллограмме представляется n периодов исследуемого напряжения. Если же периоды не кратны друг другу, т. е. n не равно целому числу, то кривые, прочерчиваемые электронным лучом на экране в течение каждого периода напряжения развертки, не будут повторять друг друга. Возникнет эффект бегущего изображения или же экран будет заполнен целым семейством сдвинутых относительно друг друга кривых. Выполнение условия $T_p = nT_c$ достигается при помощи синхронизации. Генератору, вырабатывающему напряжение развертки, принудительно навязывается частота синхронизирующего сигнала, равная или кратная частоте исследуемого напряжения. Режим синхронизации может быть внутренним или внешним. В первом случае синхронизирующим является сам исследуемый сигнал, поступающий на генератор развертки, во втором – внешний сигнал, который подается на вход «Внешняя синхронизация» на панели осциллографа.

Генератор развертки работает в двух основных режимах: непрерывном и ждущем. При непрерывной развертке каждый последующий цикл пилообразного напряжения непрерывно следует за предыдущим. Непрерывная развертка удобна, когда исследуется непрерывный периодический процесс или периодическая последовательность импульсов с небольшой скважностью. Если скважность велика, то длительность импульса составляет лишь малую часть периода следования и осциллограмма будет иметь вид вертикальной линии, наблюдение которой не дает информации о форме импульса. Для изучения импульсных последовательностей большой скважности и непериодических импульсов используется ждущая развертка, при которой напряжение развертки подается на горизонтально отклоняющие пластины лишь тогда, когда исследуемый импульс поступает на вход вертикально отклоняющих пластин. Длительность прямого хода развертки обычно выбирается немного больше длительности импульса для того, чтобы он помещался на экране осциллографа и занимал большую его часть.

Структурная схема осциллографа приведена на рис. 7.4.

Кроме электронно-лучевой трубки VL она содержит канал вертикального отклонения (канал Y), канал горизонтального отклонения (канал X), канал управления яркостью (канал Z), а также калибратор амплитуды и длительности. Исследуемое напряжение поступает на входное устрой-

ство канала Y , которое включает в себя аттенуатор, позволяющий при необходимости ослабить сигнал и согласовать сопротивление канала с сопротивлением источника сигнала. Усилители $A1$ и $A2$ являются предварительным и окончательным усилителями соответственно. Линия задержки ET используется при работе осциллографа в ждущем режиме. Она позволяет подавать исследуемый импульсный сигнал на пластины Y с задержкой относительно начала периода пилообразного напряжения. Это дает возможность наблюдать фронт исследуемого импульса неискаженным. Без линии задержки не удалось бы наблюдать часть импульса, которая приходится на время, необходимое для формирования напряжения развертки.

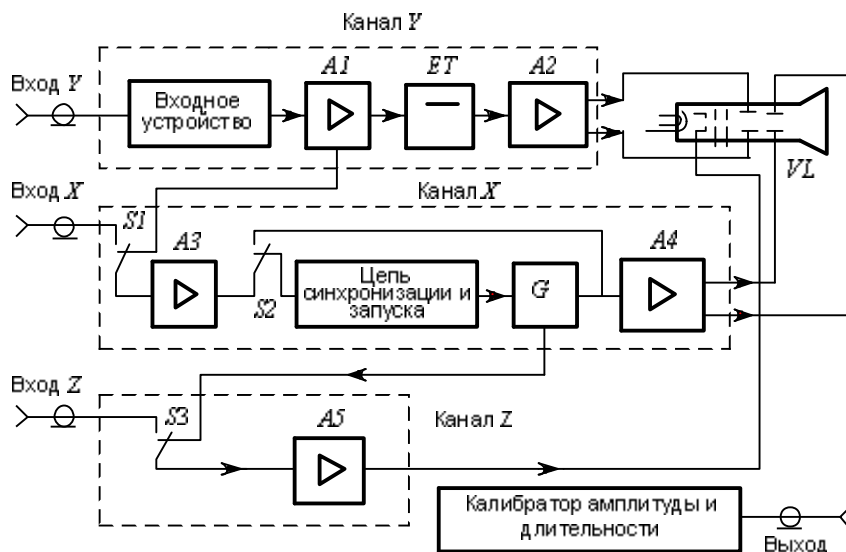


Рис. 7.4. Структурная схема осциллографа

Канал X служит для формирования и / или усиления напряжения, поступающего затем на горизонтально отклоняющие пластины и вызывающего горизонтальное перемещение луча. Канал X содержит предварительный и окончательный усилители ($A3$ и $A4$ соответственно), цепь синхронизации и запуска, а также генератор развертки G . Переключатель $S1$ служит для подачи синхронизирующего напряжения с канала Y (внутренняя синхронизация) или со входа X (внешняя синхронизация). Если переключатели $S1$ и $S2$ находятся в левом положении, то генератор раз-

вертки отключается и на пластины X поступает (через усилители $A3$ и $A4$) напряжение со входа X .

Канал Z служит для управления яркостью свечения экрана ЭЛТ. Управление производится как вручную, так и автоматически. Например, производится автоматическое подсвечивание прямого хода ждущей развертки. В промежутке между импульсами, запускающими ждущую развертку, яркость пятна снижена во избежание прожигания люминофорного слоя.

Калибратор амплитуды и длительности является источником напряжений с известной амплитудой и длительностью. Эти напряжения подаются с выхода калибратора на вход Y для контроля масштабов (коэффициентов отклонения) по осям Y (В/деление, мВ/деление) и X (мкс/деление, мс/деление). Знание масштабов необходимо для измерения напряжений и интервалов времени, поскольку непосредственно оператору доступно считывание только расстояний (сантиметры, деления) по масштабной сетке на экране.

Электронные осциллографы характеризуются рядом технических и метрологических параметров. К наиболее важным относятся следующие:

- калиброванные значения коэффициента отклонения;
- полоса пропускания, т. е. диапазон частот, в пределах которого коэффициент усиления канала Y уменьшается на 3 дБ по отношению к некоторой опорной частоте;
- диапазон изменения длительности развертки;
- входное сопротивление и входная емкость канала Y ;
- точностные параметры, характеризующие погрешности измерения напряжения и интервалов времени.

При выборе осциллографа следует исходить из характера измеряемого сигнала (гармонический или импульсный) и его вероятных параметров (ширина спектра, граничные частоты, частота следования, скважность, амплитуда напряжения и т. д.).

Осциллографы подразделяются на универсальные, скоростные, стробоскопические, запоминающие, специальные. Наиболее употребительными являются универсальные осциллографы (в ГОСТ обозначение С1). Они позволяют проводить исследования электрических сигналов в широком диапазоне частот, амплитуд и длительностей сигналов. Полоса пропускания достигает 200–350 МГц, диапазон амплитуд от единиц милливольт до сотен вольт. Возможно измерение длительностей импульсов от нескольких наносекунд до секунд.

Для одновременного исследования нескольких сигналов используют многолучевые осциллографы. Обычно они имеют два канала вертикального отклонения, однако выпускаются также осциллографы с большим числом каналов (до пяти).

Контрольные вопросы

1. Расскажите про назначение, устройство и принцип работы электронно-лучевого осциллографа.
2. Как осуществляется перемещение электронного луча осциллографа в вертикальном и горизонтальном направлениях? В чем заключается основное назначение генератора развертки?
3. Чем обусловлена нелинейность развертки осциллографа?
4. В каких случаях на экране осциллографа может возникнуть эффекты бегущего изображения и сдвига кривых относительно друг друга? Как с ними бороться?
5. Чем отличаются режимы внутренней и внешней синхронизации?
6. Назовите основные режимы работы генератора развертки.
7. Приведите структурную схему цепей управления осциллографа, объясните назначения основных элементов схемы.
8. Назовите основные технические и метрологические параметры электронно-лучевых осциллографов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: учеб. пособие для втузов – М.: Дрофа, 2005. – 415 с.
2. Панфилов В.А. Электрические измерения: учебник для сред. проф. образования – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 288 с.
3. Хромоин П.К. Электротехнические измерения: учеб. пособие для сред. проф. образования – М.: Форум, 2008. – 287 с.
4. О техническом регулировании: федер. закон Рос. Федерации от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ: принят Гос. думой Федер. Собр. Рос. Федерации 15 декабря 2002 г.: одобр. Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 18 декабря 2002 г. // Рос. газ. – 2002. – 31 декабря.
5. Лифшиц И.М. Основы стандартизации, метрологии и сертификации. – М.: Юрайт, 2001. – 285 с.
6. Вайнер Б.М., Гуров С.П. Аналого-цифровые преобразователи в цифровых измерительных приборах: учеб пособие для вузов – Магнитогорск: МГТУ, 1999. – 55 с.
7. Тюрин Н.И. Введение в метрологию. Учебное пособие – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 248 с.
8. Основы метрологии и электрические измерения: учебник для вузов / Авдеев Б.Я., Антонюк Е.М., Душин Е.М.: Под ред. Душина Е.М. – 6-е изд. перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
9. Измерения в электронике: Справочник. Под ред. Кузнецова В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.
10. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений М.: Мир, 1990. – 535 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ	4
1.1. Общие сведения	4
1.2. Магнитоэлектрические механизмы	4
1.3. Амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы	8
1.4. Электродинамические и ферродинамические механизмы	9
1.5. Амперметры и вольтметры электродинамической и ферродинамической систем.....	12
1.6. Ваттметры электродинамической и ферродинамической систем	14
1.7. Механизмы электромагнитной системы	17
Контрольные вопросы	22
2. МАСШТАБНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ	23
2.1. Шунты и добавочные резисторы	23
2.2. Измерительные трансформаторы	27
2.3. Датчики тока на основе эффекта Холла	32
Контрольные вопросы	33
3. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ	35
3.1. Измерение постоянных токов и напряжений	35
3.2. Измерение переменных токов и напряжений электромехани- ческими приборами без преобразователей рода тока	38
3.3. Измерение переменных токов и напряжений магнито- электрическими приборами с преобразователями рода тока	41
3.4. Методические погрешности	43
3.5. Методы измерения переменных токов и напряжений промышленной частоты	45
Контрольные вопросы	53
4. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ	55
4.1. Общие сведения	55
4.2. Основные методы и средства измерения сопротивления электрической цепи постоянному току	55
Контрольные вопросы	64

5. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ	65
5.1. Измерение мощности в цепях постоянного тока	65
5.2. Измерение активной мощности в цепях переменного тока	66
5.3. Измерение реактивной мощности и энергии в однофазной и трехфазной цепях	72
Контрольные вопросы	77
6. ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ	78
6.1. Основные понятия	78
6.2. Аналого-цифровые преобразователи и цифровые вольтметры ..	79
Контрольные вопросы	86
7. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ	87
Контрольные вопросы	93
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	93
ОГЛАВЛЕНИЕ	94

ХРАМШИН Тимур Рифхатович
ХРАМШИН Рифхат Рамазанович
КОРНИЛОВ Геннадий Петрович
НИКОЛАЕВ Александр Аркадьевич

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Учебное пособие