

Дубинский Г. Н., Левин Л. Г.

Наладка устройств электропитания напряжением до 1000 В

Силовые трансформаторы

Распределительные устройства

Устройства релейной защиты и автоматики

Теория и практика для специалиста-наладчика

Секреты наладки и ремонта

Основные руководящие документы

Справочная информация

ISBN 978-5-91359-147-0



9 785913 591470

Находка для специалиста!



УДК 621.399
ББК 32.882
Д 93

Дубинский Г. Н., Левин Л. Г.

Наладка устройств электроснабжения напряжением до 1000 В. — М.: СОЛОН-Пресс, 2015. — 400 с.: ил. — (Серия «Библиотека инженера»).

ISBN 978-5-91359-147-0

В книге изложены методы наладки низковольтных (до 1000 В) систем электроснабжения широкого диапазона применения. Рассматриваются вопросы электрических измерений, испытательного оборудования и собственно типовые методики испытаний в соответствии с ПУЭ. Книга написана на уровне доступном для специалистов среднего звена: техников-электриков и электромонтеров предприятий промышленного, сельскохозяйственного и культурного назначения, жилищно-коммунального хозяйства. Может быть использована для учащихся средних специальных учебных заведений, курсов повышения квалификации.

КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-Пресс» можно заказать наложенным платежом (оплата при получении) по фиксированной цене. Заказ оформляется одним из трех способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123001, Москва, а/я 82.
2. Оформить заказ можно на сайте www.solon-press.ru в разделе «Книга — почтой».
3. Заказать по тел. (499) 254-44-10.

Бесплатно высылается каталог издательства по почте. Для этого присылайте конверт с маркой по адресу, указанному в п. 1.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя.

Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет Вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-Пресс», считав его с адреса www.solon-press.ru/kat.doc.

Интернет-магазин размещен на сайте www.solon-press.ru.

По вопросам приобретения обращаться: **ООО «ПЛАНЕТА АЛЬЯНС»**

Тел: (495) 782-38-89, www.aliants-kniga.ru

Сайт издательства «СОЛОН-Пресс»: www.solon-press.ru

E-mail: avtor@solon-press.ru

ISBN 978-5-91359-147-0

© Дубинский Г. Н., Левин Л. Г., 2015

© Макет и обложка «СОЛОН-Пресс», 2015

1. Электрические измерения

1.1. Метрология

1.1.1. Основные понятия и определения

Измерение значений физических величин производят с помощью *средств измерения* (СИ). Измерения с помощью электрических приборов называют *электрическими измерениями*. При *прямом* измерении значение измеряемой величины получают непосредственно из опыта, пример — измерение электрического напряжения вольтметром. При *косвенном* измерении искомое значение находят расчетным путем на основании известной зависимости между измеряемой величиной и другими величинами, которые можно измерить непосредственно; пример — расчет сопротивления резистора на основании закона Ома по значениям тока через резистор и падения напряжения на нем, измеренным посредством амперметра и вольтметра

Результат измерения всегда отличается от истинного значения измеряемой величины из-за погрешности измерений. *Абсолютная погрешность* ΔA равна разности между измеренным $A_{из}$ и действительным A_d значениями измеряемой величины A :

$$\Delta A = A_{из} - A_d.$$

Под действительным значением измеряемой величины понимают то значение ее, которое найдено экспериментальным путем с помощью образцовых приборов и для данной цели может быть принято за истинное.

Относительной погрешностью измерения называют отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины:

$$\delta_A = \Delta A / A_d.$$

Приведенной относительной погрешностью называют отношение абсолютной погрешности к разности между верхним и нижним пределами измерительного прибора, а если нижний предел равен нулю, то — к верхнему пределу измерения в данном диапазоне a_B (для двусторонней шкалы — к сумме верхних пределов):

$$\delta_{пр} = \Delta A / a_B.$$

1. Электрические измерения

Предельное значение приведенной относительной погрешности, выраженное в процентах, указывает класс точности приборов, погрешность которых не зависит от значения измеряемой величины; к ним относятся большинство стрелочных показывающих и самопишущих приборов. Предельная относительная погрешность приборов, зависящая от измеряемой величины, определяется формулой

$$\delta_m = c + d (x_k/x - 1),$$

а класс прибора — отношением c/d , где c и d — постоянные числа, x_k — конечное значение диапазона измерений, x — значение измеренной величины. Пример:

$\delta_m = 0,05 + 0,02(U_k/U - 1)$, класс точности 0,05/0,02 (вольтметр) или

$\delta_m = 0,2 + 0,1(I_k/I - 1)$, класс точности 0,2/0,1 (амперметр).

Стандартизированы классы 0,05 ... 4,0, но выпускаются и приборы с нормированной погрешностью (10—15)%.

Погрешность при косвенных измерениях зависит от того, какими соотношениями связана искомая величина с непосредственно измеряемыми величинами, и от погрешностей измерения этих величин. Если результат косвенных измерений величины A равен сумме или разности двух или нескольких величин, например $A = B \pm C$, то наибольшая возможная относительная погрешность будет:

$$\delta_a = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta B + \Delta C}{B \pm C},$$

где ΔB и ΔC — наибольшие возможные погрешности измерения величин B и C , а знак «+» или «-» выбирается в зависимости от того, складываются или вычитаются эти величины в формуле $A = B \mp C$.

Если искомая величина вычисляется как произведение нескольких величин, например

$$A = B^m C^n,$$

то наибольшая возможная относительная погрешность находится по формуле

$$\delta_a = m\delta_B + n\delta_C,$$

где δ_B и δ_C — относительные погрешности непосредственного измерения величин B и C .

Когда погрешности отдельных непосредственных измерений имеют разные знаки, то для учета самого неблагоприятного случая эти погрешности суммируют с одинаковыми знаками.

Различают систематические и случайные погрешности измерений. При повторных измерениях одной и той же величины *систематическая* погрешность остается неизменной или изменяется закономерно, а *случайная* изменяется произвольным образом. Постоянная систематическая погрешность может возникнуть, например, при пользовании СИ, параметры которых отличны от номинальных, переменная — вследствие закономерного изменения напряжения источника питания, в частности, из-за разряда аккумулятора. Случайные причины либо неизвестны, либо проявление их носит случайный характер (например, наводки от электромагнитных полей). Снижение случайных погрешностей достигается либо уменьшением их влияния (например, экранировкой измерительных цепей), либо повторением измерений.

1.1.2. Типичные составляющие погрешности измерений

1.1.2.1. Методические погрешности измерений (погрешности метода) и их причины

а) Несоответствие выбранного прибора или метода измерения реальным характеристикам измеряемой величины. Пример: измеряется амплитудное значение U_m напряжения переменного тока вольтметром, реагирующим на действующее значение напряжения U . Предполагая, что измеряемое напряжение имеет синусоидальную форму, вычисляют амплитудное значение как $U_m = \sqrt{2}U$. Возникающая при этом систематическая ошибка будет тем большей, чем больше степень отклонения реальной кривой напряжения от синусоиды.

б) Выход значений контролируемого параметра за пределы принятого диапазона. Пример: измеряется ток нагрузки линии с помощью трансформатора тока. Известно, что при большой кратности тока погрешность измерения может превысить допустимые пределы.

в) Отклонение за допустимые пределы разницы между значениями измеряемого параметра на входе прибора и в точке отбора. Пример — измерение напряжения на нагрузке: погрешность зависит от падения напряжения на соединительных проводах, а значит, и от расстояния до вольтметра.

г) Отличие принятого алгоритма вычислений от более строгой функциональной зависимости, связывающей искомую величину с результатами прямых измерений. Например, изменение активного сопротивления с температурой обычно выражают следующим алгоритмом:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)],$$

где R_1 — сопротивление, измеренное при температуре T_1 ; R_2 — сопротивление, измеренное при температуре T_2 ; α — температурный коэффициент сопротивления.

Для прецизионных измерений применяют более точную трехчленную формулу академика Б. С. Якоби:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1)^2],$$

где β — второй температурный коэффициент.

1.1.2.2. Инструментальные погрешности

а) Погрешности, вызываемые медленно меняющимися внешними причинами, как то: погодные параметры, напряженность электрических и магнитных полей, напряжение источников питания и пр.

б) Погрешности, обусловленные ограниченной разрешающей способностью СИ. Пример: измерение параметра, значение которого соизмеримо с ценой деления шкалы прибора.

в) Динамические погрешности, обусловленные инерционностью прибора. Зависят как от свойств самого прибора, так и от характера изменения во времени измеряемой величины. Пример: измерение параметров быстропеременных процессов с помощью самописца.

г) Погрешности, вызываемые взаимодействием данного СИ с объектом измерения и другими приборами. Пример: измерение напряжения источника малой мощности вольтметром с невысоким внутренним сопротивлением.

д) Погрешности передачи измерительной информации. Примеры: падение напряжения в соединительных проводах, «размытое» изображение на экране осциллографа.

1.1.2.3. Погрешности, вносимые оператором (субъективные погрешности)

а) Погрешности считывания значений измеряемых величин со шкал и диаграмм.

б) Погрешности обработки кривых без применения технических средств. Пример: обработка осциллограмм с целью определения мгновенных значений тока или напряжения, сдвига фаз и др. параметров.

в) Погрешности, вызываемые воздействием оператора на объект измерения и СИ. Пример: влияние оператора и расположения проводов при измерении малых емкостей, параметров полевых транзисторов, микросхем и т. п.

Кроме того, свою долю погрешности могут внести средства вычислительной техники (калькуляторы, компьютеры и пр.), применяемые при обработке промежуточных результатов измерения (погрешность вычислений).

1.1.2.4. Основная и дополнительная погрешности СИ

Погрешности, зависящие от внешних условий (влияющих факторов), принято подразделять на основные и дополнительные. *Основной погрешностью* (δ_0) называют погрешность в условиях, принятых за нормальные. *Дополнительные* погрешности (δ_d) возникают при отклонении влияющих факторов от нормальных значений. В число влияющих факторов входят:

а) Изменение температуры. Отклонение температуры, при которой производится измерение, от той, при которой градуировался прибор, вызывает погрешность (δ_T), равную основной на каждые 10°C отклонения.

б) Отклонение напряжения от номинального значения. Эту погрешность (δ_H) следует учитывать при настройке частотных реле, ею можно пренебречь при снятии векторных диаграмм, в других случаях — исключить выбором соответствующей схемы испытания.

в) Влияние внешних магнитных полей. Погрешность (δ_M) зависит от конструкции и степени защиты прибора и определяется в функции напряженности магнитного поля.

г) Отклонение положения прибора от нормального. При отклонении положения прибора на 10° погрешность (δ_n) численно равна классу прибора.

д) Погрешность измерительных трансформаторов (δ_K), возникающая из-за отклонения коэффициента трансформации от номинального значения.

1.1.2.5. Общая погрешность

Суммарная дополнительная погрешность рассчитывается как

$$\delta_{\text{д}} = \sqrt{\delta_{\text{т}}^2 + \delta_{\text{н}}^2 + \delta_{\text{м}}^2 + \delta_{\text{н}}^2 + \delta_{\text{к}}^2},$$

а общая погрешность будет

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{о}}^2 + \delta_{\text{д}}^2}.$$

Пример. Определить возможную погрешность измерения напряжения срабатывания реле 50 В при следующих условиях: температура окружающей среды +5°; измерение производится вольтметром с пределом 150 В, класс точности 0,5. Пусть известно, что напряженность внешнего магнитного поля в месте расположения вольтметра составляет 1 Э (79,6 А/м), соответствующая погрешность пропорциональна напряженности и при 5 Э (398 А/м) приведенная погрешность равна 2,5%; наклон прибора от горизонтального положения 10°.

Предельное значение основной погрешности вольтметра на делении 50 В составит $\delta_{\text{о}} = 0,5 \cdot 150/50 = 1,5\%$. Если прибор градуировался при 15°С, то дополнительная погрешность от изменения температуры будет также 1,5%.

Дополнительная погрешность от влияния магнитного поля составит $2,5 \cdot 3/5 = 1,5\%$, от наклона прибора $0,5 \cdot 3 = 1,5\%$; погрешности от изменения напряжения вольтметр не имеет.

Возможная суммарная дополнительная погрешность составит тогда

$$\delta_{\text{д}} = \sqrt{1,5^2 + 1,5^2 + 1,5^2} = 2,6\%,$$

а возможная полная погрешность

$$\delta = \sqrt{1,5^2 + 2,6^2} = 3,0\%.$$

Погрешность можно снизить, применив вольтметр с меньшим верхним пределом измерения, например 100 или 50 В: тогда основная погрешность уменьшится соответственно до 1 или 0,5%, а полная до 2,0 или 1,0%. Дальнейшего снижения погрешности можно достичь путем устранения или уменьшения воздействия влияющих факторов, например, установив вольтметр в нормальное положение.

1.2. Системы электроизмерительных приборов

1.2.1. Аналоговые приборы

Измерительные приборы, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины, называют *аналоговыми*. Эти приборы имеют оцифрованную шкалу, а перемещение их подвижной части (угловое или линейное) с указателем (стрелкой) определяется значением измеряемой величины. Отношение перемещения указателя к соответствующему значению измеряемой величины называется *чувствительностью*, обратная величина — *постоянной* прибора. Например, чувствительность к току может быть выражена в размерности деление/А, к напряжению — деление/В. Разность значений, обозначенных на двух соседних делениях шкалы, называется *ценой деления*.

Цифровые приборы преобразуют непрерывную входную величину (напряжение, ток и др.) в отдельные (дискретные) сигналы, а измерительная информация представляется в числовой форме на цифровом индикаторе (дисплее, табло). Поэтому цифровой прибор всегда содержит два основных функциональных узла: аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровое отсчетное устройство. Система приборов отечественного производства часто обозначается буквами русского алфавита: цифровая — буквой Ц, аналоговые — в зависимости от конструкции измерительного механизма (ниже — в скобках).

В приборах *магнитоэлектрической* системы (М) подвижная часть механизма отклоняется в результате взаимодействия двух магнитных полей: постоянного магнита и катушки с током. Угол поворота стрелки прямо пропорционален току в катушке (измеряемой величине), а направление поворота (знак угла) зависит от направления тока. Особо чувствительные магнитоэлектрические приборы называются *гальванометрами*.

В обычных магнитоэлектрических вольтметрах и амперметрах подвижная часть установлена на подпятниках, из-за трения в которых эти приборы пригодны только для измерения сравнительно больших токов. В гальванометрах подвижная катушка подвешивается на металлической нити или ленте, благодаря чему устраняется трение в опорах и уменьшается противодействующий момент, а следовательно повышается чувствительность прибора и уменьшается погрешность. Измерение угла поворота катушки оптическим

путем обеспечивается с помощью зеркальца, в связи с чем такие гальванометры часто называют зеркальными. При эксплуатации они должны устанавливаться по уровню или отвесу.

Зеркальный отсчет выполняется субъективным или объективным методом. В первом случае перед зеркалом размещается освещенная шкала с делениями. Отраженный от зеркальца луч света направляется в зрительную трубу, в которой видна часть шкалы. Одну из отметок шкалы совмещают с вертикальной чертой на объективе, и при повороте катушки оператор увидит другую отметку шкалы, — деление, соответствующее измеряемой величине. Во втором случае узкий луч света направляют непосредственно на зеркальце. Отразившийся от него луч попадает на шкалу в виде тонкой световой полоски, которая перемещается по шкале на расстояние, пропорциональное углу поворота катушки. Когда не представляется возможным пользоваться зеркальными гальванометрами, требующими стационарной установки, применяют переносные гальванометры меньшей чувствительности (например, микроамперметры).

Катушка гальванометра замыкается на сопротивление, от значения которого зависит характер и время ее движения. Это объясняется тем, что при повороте катушки в поле постоянного магнита в ней индуцируется ЭДС, и возникающий в замкнутой цепи ток тормозит движение катушки. Кроме того, движение катушки тормозится трением о воздух и закручиванием подвеса. Суммарное действие сил, тормозящих (успокаивающих) движение катушки, оценивается так называемым *коэффициентом успокоения* β , по значению которого судят о характере движения. При $\beta < 1$ процесс носит колебательный характер, причем при $\beta = 0$ колебания становятся незатухающими. Если $\beta > 1$, катушка аperiodически приближается к положению равновесия, не переходя его. Пограничный случай $\beta = 1$ называют режимом критического успокоения, когда катушка движется тоже аperiodически, но наиболее ускоренно. Сопротивление, на которое замкнута катушка в этом режиме, называют *внешним критическим* сопротивлением.

Гальванометры с повышенным моментом инерции подвижной части называют *баллистическими*. Наибольшее отклонение α_m подвижной части такого гальванометра пропорционально количеству электричества Q импульса тока, протекшего через катушку:

$$C_q \alpha_m = Q,$$

где C_q — баллистическая постоянная (в кулонах на деление шкалы прибора). Наибольшая чувствительность получается при коэффициенте успокоения $\beta=0$, что может иметь место при очень большом сопротивлении внешней цепи гальванометра. По мере увеличения β чувствительность падает, при критическом успокоении — в 2,7 раза.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы выполняются обычно на ток до 0,1 А. Для измерения больших токов применяются встроенные или наружные шунты — прецизионные резисторы с малым сопротивлением (порядка десятых, тысячных долей ома и меньше). Шунт параллельно с катушкой включается в цепь измеряемого тока последовательно с нагрузкой. Номинальные значения падения напряжения на шунте стандартизированы и составляют обычно 75 или (реже) 45 мВ. Внутренние (встроенные в прибор) шунты изготавливаются на токи до нескольких десятков ампер. Такие амперметры называют прямоточными и включают в цепь тока непосредственно. Наружные шунты на большие токи (сотни и тысячи ампер) снабжаются двумя парами зажимов: внешняя (токовая) служит для подключения в цепь измерительного тока, внутренняя (потенциальная) — для соединения с прибором (милливольтметром, градуированным в амперах). Такое устройство позволяет избежать погрешности от включения в измерительную цепь падения напряжения на токовых зажимах.

В вольтметрах последовательно с чувствительным измерительным элементом включается встроенный резистор с достаточно большим сопротивлением; для расширения пределов измерения применяются наружные добавочные резисторы. Вольтметр подключается к тем точкам цепи, напряжение между которыми требуется измерить, в частности, параллельно нагрузке. При этом надо учитывать, что сопротивление цепи вольтметра должно быть существенно выше внутреннего сопротивления объекта измерения — практически не менее чем на порядок. добавочного резистора должно быть $R_d = 500/50 - 2 = 8$ МОм.

Основные достоинства приборов магнитоэлектрической системы — равномерная (линейная) шкала, высокая точность (классы от 0,1 до 1,5), большая чувствительность, малое собственное потребление, незначительное влияние внешних магнитных полей; недостатки — непосредственное измерение только постоянного тока, чувствительность к перегрузкам и механическим воздействиям и др.

В цепях переменного тока измерители магнитоэлектрического типа могут использоваться лишь в двух случаях: 1) подвижная часть прибора имеет малый момент инерции, что позволяет ей следовать за изменением измеряемого сигнала, и 2) прибор применяется совместно с выпрямителем или термопреобразователем. Во всех остальных случаях магнитоэлектрический прибор измерит только постоянную составляющую сигнала, а в цепи синусоидального тока промышленной частоты и выше его показания будут равны нулю; на промышленной частоте заметны вибрация стрелки и характерный звук.

Электромагнитные приборы (Θ) содержат неподвижную катушку и ферромагнитный сердечник, который втягивается внутрь катушки, когда по ней проходит измеряемый ток. Угол отклонения подвижной части пропорционален квадрату тока в катушке, поэтому направление поворота указателя не зависит от полярности тока. В цепи переменного тока прибор измеряет действующее (эффективное) значение тока. Шкала прибора в начале сжата, а в конце растянута.

Достоинства электромагнитных приборов — простота конструкции, надежность, пригодность для измерений в цепях как постоянного, так и переменного тока, способность выдерживать большие перегрузки (в 2...3 раза). Недостатки — большое собственное потребление, невысокая точность (обычно 1,5...2,5%), малая чувствительность, неравномерность шкалы. Существенное влияние на показания приборов оказывают внешние магнитные поля. Это влияние почти полностью исключается в так наз. *астатических* приборах. Астатический измерительный механизм содержит два одинаковых электромагнитных элемента, расположенных так, что действие внешнего магнитного поля на них взаимно компенсируется. Однако астатические приборы значительно сложнее и дороже.

Приборы электромагнитной системы рекомендуется применять для измерения переменного тока и напряжения. Сравнительно простые, надежные и дешевые, они получили широкое распространение в качестве щитовых приборов.

Рассмотренные электромагнитные приборы относят к группе нерезонансного типа: частота собственных колебаний их подвижной части намного меньше частоты измеряемого сигнала. Существуют и применяются также электромагнитные приборы резонансного типа, частота собственных колебаний подвижной части кото-

рых равна частоте тока в катушках. На этом принципе действуют электромагнитные частотомеры и вибрационные гальванометры.

Электродинамические приборы (Д) используют взаимодействие катушек с током, одна из которых неподвижна, а другая может поворачиваться на оси. Угол поворота подвижной части пропорционален произведению токов в этих катушках, или квадрату измеряемого тока (напряжения), если катушки соединены последовательно. Совершенствование конструкции позволяет приблизить шкалу к равномерной, кроме ее начальной части. В ваттметрах катушки не соединяются, а включаются в отдельные цепи: одна — параллельно нагрузке, другая — последовательно с ней. Электродинамические приборы применяются преимущественно на переменном токе, но могут работать и в цепях постоянного тока.

Достоинства приборов — высокая точность (до 0,1%), работа на постоянном и переменном токе, измерение действующего значения переменного тока и напряжения. Недостатки: невысокая чувствительность, влияние температуры на показания, значительное собственное потребление, ограниченный частотный диапазон (до 1...5 кГц).

К электродинамической системе относятся и так называемые *ферродинамические* приборы, в которых для усиления индукции применен магнитопровод из магнитомягкого материала. Этим достигается увеличение вращающего момента и уменьшение влияния внешних магнитных полей, повышение чувствительности и снижение потребления. Вместе с тем наличие нелинейного элемента (магнитопровода) снижает точность приборов. Такие измерительные механизмы находят применение в самописцах, где требуется большой вращающий момент, а также при воздействии тряски, вибрации, внешних магнитных полей.

Индукционный измерительный механизм (И) содержит неподвижные электромагниты и подвижную проводящую часть в виде, например, алюминиевого диска. Обмотки электромагнитов питаются переменным током. Переменные магнитные потоки электромагнитов пронизывают подвижную часть, индуцируют в ней токи и, взаимодействуя с ними, вызывают ее перемещение. Таким образом, индукционные измерительные механизмы могут работать только в цепи переменного тока. Применяются они как счетчики электрической энергии и реже как ваттметры. При этом обмотка одного из электромагнитов включается последовательно в цепь нагрузки, обмотка другого — параллельно нагрузке. Магнитные

1. Электрические измерения

потоки этих обмоток Φ_1 и Φ_U , пропорциональные соответственно току нагрузки и напряжению на ней, создают на диске вращающий момент

$$M = k\Phi_1\Phi_U \sin \psi,$$

где k — коэффициент, ψ — угол между векторами потоков.

Путем надлежащего выбора конструктивных и схемных элементов можно добиться выполнения условий $\psi = 90^\circ - \varphi$ или $\psi = \varphi$ ($\cos \varphi$ — коэффициент мощности). В первом случае вращающий момент будет пропорционален активной мощности $P = UI \cos \varphi$, во втором — реактивной $Q = UI \sin \varphi$. Спиральная пружина создает противодействующий момент, так что угол поворота диска пропорционален мощности. При отсутствии противодействующей пружины и равномерном вращении диска такое устройство будет отсчитывать соответственно активную и реактивную электрическую энергию, т. е. мощность, умноженную на время вращения диска.

Индукционные механизмы имеют большой вращающий момент, устойчивы к перегрузкам и влиянию внешних магнитных полей; недостатки их — инерционность, невысокая точность.

На основе рассмотренных систем строятся *логометры* — приборы, реагирующие на отношение двух электрических величин. Подвижная часть логометра состоит из двух катушек, жестко укрепленных на одной оси в магнитном поле неподвижных катушек. При отсутствии токов подвижная часть логометра может занимать любое положение. Напряжение на подвижные катушки подается от общего источника. Вращающие моменты M_1 и M_2 этих катушек зависят от токов I_1 и I_2 в них и угла поворота подвижной части α :

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

Моменты M_1 и M_2 направлены противоположно и при установленном положении подвижной части равны друг другу, так что

$$I_1/I_2 = F_2(\alpha)/F_1(\alpha),$$

то есть

$$\alpha = F(I_1/I_2).$$

Поскольку токи в катушках зависят от сопротивления в их цепи, логометр может быть использован для измерения полного сопротивления, включенного в цепь одной из катушек, если известно сопротивление в другой. На постоянном токе измерительные

механизмы в виде логометра применяются в омметрах, на переменном — в фазометрах, частотомерах, фарадметрах.

Электростатические приборы (С). Вращающий момент в них возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных металлических пластин, одна из которых подвижная, другая — неподвижная. Отклонение подвижной части вызывает изменение емкости, образуемой пластинами. Когда к подвижным и неподвижным пластинам подводится измеряемое напряжение, они заряжаются с противоположным знаком и притягиваются друг к другу. Перемещение подвижных пластин передается на указатель и отсчитывается по шкале. Отклонение подвижной части пропорционально квадрату напряжения и изменению емкости прибора, но благодаря надлежащему подбору формы и размеров пластин шкала прибора на участке от 15...25 до 100% практически равномерна.

Электростатические приборы используются для измерения постоянного напряжения и переменного напряжения частотой до нескольких мегагерц, преимущественно — для измерения высоких напряжений. Собственное потребление на постоянном токе близко к нулю, на переменном — весьма мало. На показания приборов практически не влияют частота измеряемого напряжения, температура окружающего воздуха и посторонние магнитные поля, но в сильной степени сказывается влияние электрических полей и влажности воздуха. Для уменьшения влияния внешних электрических полей применяется экранирование прибора; экран соединяется с одним из его зажимов, который при измерении заземляется.

Термоэлектрический (Т) прибор представляет собой совокупность одного или нескольких термопреобразователей с магнитоэлектрическим измерительным механизмом. Преобразователь состоит из термопары и нагревателя, через который пропускается измеряемый ток. ТермоЭДС преобразователя пропорциональна количеству теплоты, выделенной в нагревателе, т. е. квадрату действующего значения измеряемого тока. Поскольку это значение не зависит от частоты тока, термоэлектрическими приборами можно пользоваться и на постоянном, и на переменном токе, включая радиочастоты. К недостаткам приборов относятся инерционность, зависимость показаний от температуры окружающей среды, недопустимость перегрузки, небольшой срок службы и значительное собственное потребление.

Приборы, содержащие *электронные* компоненты (Φ), представляют собой сочетание выпрямителя, усилителя постоянного тока и магнитоэлектрического измерительного механизма.

Различают вольтметры среднего $U_{\text{ср}}$, действующего (эффективного) U и амплитудного (максимального) U_m значения. Связь между ними устанавливается посредством коэффициентов амплитуды k_a и формы k_Φ :

$$k_a = U_m / U; k_\Phi = U / U_{\text{ср}}$$

При синусоидальной форме напряжения $k_a = \sqrt{2} = 1,41$; $k_\Phi = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$.

Электронные вольтметры *среднего* значения содержат одно- или двухполупериодные выпрямители, диоды которых работают на линейной части своей вольт — амперной характеристики. В электронных вольтметрах *действующего* значения используют детекторы среднего квадратического значения. В таких детекторах применяются либо вентили с участком квадратичной вольт-амперной характеристики, либо термоэлектрические преобразователи, либо же квадратическая характеристика аппроксимируется с помощью резистивно-емкостных цепочек. Электронные вольтметры действующего значения с электростатическим измерительным механизмом не требуют использования преобразователей.

Вольтметрами *амплитудного* (пикового) значения (амплитудными вольтметрами) называют приборы, показания которых соответствуют амплитуде измеряемого синусоидального напряжения или максимальному значению напряжения, форма которого отличается от синусоиды. С этой целью в схему аналогового вольтметра вводятся выпрямитель и элемент памяти в виде конденсатора.

Различают амплитудные вольтметры с открытым или закрытым входом. Если измеряемое напряжение содержит постоянную составляющую U_0 , амплитудный детектор с открытым входом измерит суммарную величину $U_m + U_0$. Чтобы измерить амплитуду U_m , применяют схему с закрытым входом, содержащим последовательно включенный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую.

Главные достоинства электронных вольтметров — высокая чувствительность (0,1...1,0 мкВ), малое собственное потребление, широкий диапазон измеряемых напряжений (от микровольт до киловольт) и рабочих частот (до сотен мегагерц).

Оглавление

Предисловие	3
1. Электрические измерения	7
1.1. Метрология	7
1.1.1. Основные понятия и определения	7
1.1.2. Типичные составляющие погрешности измерений	9
1.2. Системы электроизмерительных приборов	13
1.2.1. Аналоговые приборы	13
1.2.2. Цифровые приборы	21
1.3. Техника измерений	25
1.3.1. Измерение постоянного тока и напряжения	25
1.3.2. Измерение переменного тока и напряжения	28
1.3.3. Измерение электрического сопротивления	31
1.3.4. Измерение электрической мощности	36
1.3.5. Измерение электроэнергии	39
1.3.6. Измерение частоты, интервалов времени и угла сдвига фаз	43
1.3.7. Измерение емкости и индуктивности	49
1.3.8. Измерение магнитных величин	52
1.4. Осциллографирование	55
1.4.1. Светолучевые осциллографы	56
1.4.2. Электронно-лучевые осциллографы (электронные, или катодные)	58
1.4.3. Цифровые осциллографы	75
1.5. Организация измерений	86
1.5.1. Подготовка работ	86
1.5.2. Выполнение измерений	88
1.5.3. Эксплуатация средств измерения	88
2. Регулирование и контроль электрических величин при испытаниях. Элементы аппаратуры управления и их проверка	90
2.1. Регулирование электрических величин	90
2.1.1. Регулирование тока	90
2.1.2. Регулирование напряжения	97
2.1.3. Регулирование угла сдвига фаз	99
2.2. Контроль электрических величин	102
2.2.1. Индикация	102
2.2.2. Фазировка	105
2.2.3. Построение векторных диаграмм	110
2.2.4. Снятие векторных диаграмм	117
2.3. Проверка электромеханических аппаратов	119
2.4. Полупроводниковая элементная база	125
2.4.1. Основные понятия	125
2.4.2. Диоды	126
2.4.3. Транзисторы	128
2.4.4. Логические элементы	132

2.4.5. Интегральные микросхемы	133
2.5. Микропроцессорные устройства	142
2.5.1. Общая характеристика.....	142
2.5.2. Микропроцессор.....	142
2.5.3. Внешние устройства	144
2.6. Проверка радиоэлектронных цепей	145
2.6.1. Проверка отдельных компонентов.....	145
2.6.2. Логические схемы. Интегральные микросхемы.....	150
2.6.3. Помехи.....	151
2.6.4. Проверка статических реле.....	154
3. Испытания и проверки типовых цепей и элементов устройств электроснабжения до 1000 В.....	157
3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ).....	157
3.1.1. Общие сведения.....	157
3.1.2. Характеристики и классификация АВ.....	159
3.1.3. Проверка расцепителей.....	162
3.1.4. Автоматические выключатели переменного тока серий АХХХХ.....	164
3.1.5. Автоматические выключатели серий ВА.....	176
3.1.6. Автоматические выключатели серии «Электрон» (ЗАО «Контактор», г. Ульяновск)	178
3.1.7. Автоматические выключатели зарубежных фирм.....	181
3.1.8. Автоматические выключатели с микропроцессорными блоками управления и защиты	189
3.1.9. Комплектные устройства для испытания расцепителей током нагрузки.....	193
3.2. Измерение сопротивления заземления	205
3.2.1. Основные понятия.....	205
3.2.2. Конструктивное выполнение заземляющих устройств	210
3.2.3. Сопротивление растеканию.....	212
3.2.4. Заземлители	216
3.2.5. Защитные функции заземления и зануления.....	224
3.2.6. Зануление.....	225
3.2.7. Измерения	227
3.3. Проверка цепи между заземлителями и заземляемыми элементами.....	249
3.3.1. Виды защитных проводников и требования к ним.....	249
3.3.2. Проверка цепи между заземлителями и заземляемыми элементами	254
3.3.3. Измерение сопротивления заземляющих проводников. Методика измерений	256
3.4. Проверка цепи фаза-нуль.....	266
3.4.1. Сопротивление цепи фаза-нуль.....	266
3.4.2. Проверка цепи фаза-нуль и условия обеспечения безопасности в электроустановках.....	270
3.4.3. Ток КЗ и характеристики защитных аппаратов.....	272

3.4.4. Проводники в цепи фаза-нуль	273
3.4.5. Методы измерения сопротивления цепи фаза-нуль и тока однофазного замыкания.....	274
3.4.6. Измерение тока однофазного КЗ специализированными приборами.....	279
3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения (УЗО)	288
3.5.1. Назначение и принцип действия устройств защитного отключения.....	288
3.5.2. Основные характеристики и выбор УЗО	293
3.5.3. Применение УЗО в системе заземления TN	299
3.5.4. Типы и параметры УЗО	302
3.5.5. Проверка и испытания УЗО	314
3.5.6. Устройства и приборы для испытания УЗО.....	322
3.6. Проверка систем молниезащиты	326
3.6.1. Общие сведения	326
3.6.2. Защита от воздействий молнии	329
3.6.3. Проверка систем молниезащиты.....	335
3.7. Измерение сопротивления изоляции	336
3.7.1. Характеристики изоляции как диэлектрика.....	336
3.7.2. Допустимые значения сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции для различных электроустановок.....	337
3.7.3. Измерение сопротивления изоляции.....	341
3.7.4. Испытание электрической прочности изоляции приложением по- вышенного напряжения в течение 1 мин.....	349
3.8. Проверка работоспособности устройств автоматического включения резервного питания (АВР).....	352
3.8.1. Общие положения	352
3.8.2. Схемы устройств АВР.....	353
3.8.3. Испытания АВР	355
3.8.4. Устройства АВР на основе микропроцессоров.....	356
3.9. Компенсация реактивной мощности.....	358
3.9.1. Назначение	358
3.9.2. Требования ПУЭ.....	360
3.9.3. Виды и способы компенсации	361
3.9.4. Конденсаторные установки производства ООО «ДИАЛ-Энерго».....	364
3.9.5. Конденсаторные установки фирмы «Twelve Electric» (Польша).....	367
3.9.6. Регуляторы коэффициента мощности типа NOVAR (Чехия).....	370
3.9.7. Регуляторы коэффициента мощности фирмы Lovato electric (Италия)	375
3.10. Приборы компании Fluke	378
3.10.1. Цифровые мультиметры Fluke 15В, 17В и 18В на российском рынке	378

3.10.2. Новый тестер сопротивления изоляции 1555 и модернизированный тестер 1550С с возможностью тестирования напряжением до 10 кВ.....	381
3.10.3. Лучшее в отрасли семейство токоизмерительных клещей для наиболее сложных условий.....	384
3.10.4. Новый тепловизор Fluke TiS	390
3.10.5. Информация о Fluke.....	393
Литература.....	394
Список основных сокращений.....	396

Серия «Библиотека инженера»

Дубинский Генрих Нейманович, Левин Лев Григорьевич

Наладка устройств электроснабжения напряжением до 1000 В

Ответственный за выпуск

В. Митин

Макет и верстка

СОЛОН-Пресс

Обложка

СОЛОН-Пресс

ООО «СОЛОН-Пресс»

123001, г. Москва, а/я 82

Телефоны: (499) 254-44-10, (499) 795-73-26

E-mail: avtor@solon-press.ru

По вопросам приобретения обращаться:

ООО «ПЛАНЕТА АЛЬЯНС»

Тел: (495) 782-38-89, www.aliants-kniga.ru

ООО «СОЛОН-ПРЕСС»

115142, г. Москва, Кавказский бульвар, д. 50

Формат 60×88/16. Объем 25 п. л. Тираж 150 экз.

Заказ №