

**В.П. Тараканов
М.С. Макеев**

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие

**Тольятти
Издательство ТГУ
2013**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт энергетики и электротехники
Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

В.П. Тараканов, М.С. Макеев

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ЭЛЕКТРОНИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие

Тольятти
Издательство ТГУ
2013

УДК 612.316.92

ББК 31.27-05

Т36

Рецензенты:

к. т. н., администратор проекта RENAULT-NISSAN

ЗАО «ПОЛАД» *Д.Я. Яковлев*;

к. т. н., директор Института энергетики и электротехники

Тольяттинского государственного университета,

доцент *В.А. Шаповалов*

Т36 Тараканов, В.П. Информационно-измерительная техника и электроника. Электрические измерения в системах электроснабжения : учеб.-метод. пособие / В.П. Тараканов, М.С. Макеев. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. – 88 с. : обл.

В учебно-методическом пособии рассмотрены основные понятия метрологии, методы и средства измерительной техники, а также особенности измерений различных электрических величин в системах электроснабжения, приведены вопросы для самоконтроля.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавра 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 612.316.92

ББК 31.27-05

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

ВВЕДЕНИЕ

Измерительная техника, представляющая собой совокупность методов и средств получения достоверной количественной информации о характеристиках веществ, материалов, изделий, технологических процессов и физических явлений, является одним из решающих факторов технического прогресса во всех областях науки, техники, производства.

Средства электрических измерений, выпускаемые заводами, широко используются в различных отраслях промышленности, особенно в электроэнергетике. В настоящее время электроизмерительная техника интенсивно развивается во всех направлениях:

- повышается точность и быстродействие, расширяется частотный диапазон, совершенствуются конструкции многообразных электроизмерительных приборов. В ряде приборов наряду с отсчетными и записывающими устройствами предусматриваются контакты для цепей сигнализации определенных значений измеряемой величины и автоматического управления производственными процессами;
- расширяется номенклатура измерительных преобразователей, широко применяемых при измерениях различных физических величин и других целей;
- выпускаются и совершенствуются измерительные информационные системы, предназначенные для автоматического получения, передачи, обработки и представления информации в той или иной форме и значениях измеряемых или контролируемых физических величин. Эта информация может обрабатываться с помощью вычислительных машин, передаваться по каналам связи и использоваться для автоматического управления.

Производство измерений требует знания методов измерений и свойств измерительных приборов, а следовательно, и их устройства, умения выбрать надлежащий метод измерения и подобрать измерительную аппаратуру, умения собрать схему, произвести наблюдения и записи, обработать полученные данные и произвести поверку измерительных приборов.

1. ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И АУДИТЕ

Промышленные предприятия и жилищно-коммунальное хозяйство характеризуются потреблением электрической и тепловой энергии. Для изучения режимов потребления энергии (аудита) необходимо измерять и регистрировать электрические и неэлектрические величины с использованием приборов и измерительных преобразователей различного принципа действия.

В электроснабжении измеряют ток (I), напряжение (U), активную и реактивную мощности (P , Q), электроэнергию (Ph , Qh), активное, реактивное и полное сопротивления (R , X , Z), частоту (f), коэффициент мощности ($\cos \phi$); в теплоснабжении – температуру (θ), давление (p), расход энергоносителя (G), энергию (E) [2; 7].

Электрические величины измеряются аналоговыми либо цифровыми приборами с масштабирующими преобразователями. Масштабирующий преобразователь служит для изменения пределов измерения и не изменяет вид энергии. Аналоговые приборы имеют измерительный механизм, являющийся, строго говоря, также преобразователем, поскольку преобразует электрическую величину в показания счетного устройства. В цифровом приборе электрическая величина преобразуется из аналоговой в цифровую форму и отображается на табло. Измерительный механизм здесь отсутствует.

Аналоговые и цифровые приборы могут регистрировать графики в реальном времени. В аналоговых приборах для регистрации графика счетное устройство совмещается с регистрирующим, а в цифровых используется цифровая печать.

Неэлектрические величины, измеряемые электрическими приборами, требуют преобразования вида энергии, масштабирования и даже преобразования формы сигнала, что усложняет приборы и ухудшает их точность.

Номенклатура приборов, используемых в энергоснабжении для измерения электрических и неэлектрических величин, весьма разно-

образна по методам измерений и по принципам реализации. Наряду с методом непосредственной оценки часто используются компенсационный и дифференциальный методы, повышающие точность. Однако сложилась устойчивая тенденция применять ограниченное число методов для измерения электрических и неэлектрических величин как в условиях эксплуатации, так и при аудите систем промышленного энергоснабжения.

В условиях эксплуатации обычно используются следующие методы: непосредственной оценки – для измерения электрических величин и компенсационный – неэлектрических. Так как приборы сосредоточены на диспетчерском пункте, то отсутствуют проблемы преобразования сигнала и их электроснабжения. Можно использовать аналоговые и регистрирующие приборы различных систем.

При аудите, в случае использования методов непосредственной оценки и компенсационного, когда приборы рассредоточены по местам измерений, возникает проблема помехоустойчивости информации, электропитания приборов и унификации выходных сигналов для осуществления многоканальной регистрации, поэтому часто применяют специальные приборы с автономным питанием и запоминающими устройствами.

Существующая номенклатура приборов не позволяет решать все задачи в полной мере, в основном из-за трудностей измерения неэлектрических величин, поэтому устройства для их измерения электрическими методами постоянно развиваются и весьма разнообразны по принципам действия и техническому выполнению.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие величины измеряют в электроснабжении?
2. Какие устройства используются для измерения электрических величин?
3. Можно ли измерять неэлектрические величины электрическими приборами?
4. Какие методы обычно используют в условиях эксплуатации для измерения электрических и неэлектрических величин?

2. ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ

Метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности [1; 2].

Измерение – нахождение значений физической величины опытным путём с помощью специальных технических средств.

Средства электрических измерений – технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики.

Различают следующие виды средств электрических измерений:

- 1) меры;
- 2) электроизмерительные приборы;
- 3) измерительные преобразователи;
- 4) электроизмерительные установки;
- 5) измерительные информационные системы.

Мера – средство измерения, предназначенное для воспроизведения заданного значения физических величин. В зависимости от степени точности и области применения меры подразделяются на эталоны, образцовые и рабочие.

Электроизмерительные приборы – средства электрических измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Например, амперметры, вольтметры, ваттметры, счётчики электрической энергии и др.

Измерительные преобразователи – средства электрических измерений, предназначенные для выработки сигналов электрической информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем, например шунты, делители напряжения, измерительные трансформаторы, а также первичные преобразователи неэлектрических величин в электрические сигналы (термопары, термисторы, тензорезисторы, индукционные и прочие преобразователи).

Электроизмерительные установки – совокупности функционально объединённых средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенные в одном месте.

Измерительные информационные системы – совокупности средств измерений и вспомогательных устройств, соединяемых каналами связи, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации от ряда источников в форме, удобной для обработки, передачи и использования в автоматических системах управления.

Виды измерений зависят от способа получения результата измерения и подразделяются на прямые и косвенные.

Прямыми называются измерения, результат которых получается непосредственно по показаниям приборов. Например, измерение тока – амперметром, напряжения – вольтметром, электроэнергии – счётчиком и др.

Косвенными называются измерения, при которых искомая величина непосредственно не измеряется, а её значение находится на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, полученными в результате прямых измерений. Примером может служить определение мощности в цепях постоянного тока по показаниям амперметра и вольтметра и зависимости $P = UI$.

Методы измерений зависят от совокупности приёмов использования преимуществ и средств измерений и подразделяются на метод непосредственной оценки и метод сравнения.

Метод непосредственной оценки заключается в том, что значение измеряемой величины определяется непосредственно по отсчётному устройству измерительного прибора и является простейшим методом.

Метод сравнения состоит в том, что измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой в специальной измерительной цепи. По способу осуществления метод сравнения может быть нулевым, дифференциальным, методом замещения.

При нулевом методе результирующий эффект воздействия обеих величин на измерительный прибор доводят до нуля. Этот метод часто называют компенсационным. При дифференциальном методе на изме-

рительный прибор воздействует разность измеряемой и известной величины. При методе замещения измеряемую величину замещают (заменяют) однородной с ней известной величиной, воспроизводимой мерой. При этом путём изменения известной величины добиваются такого же показания прибора, которое было при действии измеряемой величины.

Погрешность измерения – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Точность измерения – качество измерения, отражающее близость его результатов к истинному значению измеряемой величины. Высокая точность измерений соответствует малой погрешности.

Погрешность измерительного прибора – разность между показаниями прибора и истинным значением измеряемой величины.

Результат измерения – значение величины, найденное путём её измерения.

При однократном измерении показание прибора является результатом измерения, а при многократном – результат измерения находят путём статистической обработки результатов каждого наблюдения. По точности результатов измерения подразделяют на три вида: **точные** (прецизионные), результат которых должен иметь минимальную погрешность; **контрольно-поверочные**, погрешность которых не должна превышать некоторого заданного значения; **технические**, результат которых содержит погрешность, определяемую погрешностью измерительного прибора. Как правило, точные и контрольно-поверочные измерения требуют многократных наблюдений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды средств электрических измерений вам известны?
2. Что называется прямыми измерениями?
3. Что называется косвенными измерениями?
4. Какие методы измерений используются и в чем заключается их смысл?

3. ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

По способу выражения погрешности средств измерений разделяют на абсолютные, относительные и приведённые [1; 4].

Абсолютная погрешность ΔA – разность между показанием прибора A и действительным значением измеряемой величины A_0 :

$$\Delta A = A - A_0.$$

Относительная погрешность β – отношение абсолютной погрешности ΔA к значению измеряемой величины A , выраженное в процентах:

$$\beta = (\Delta A/A)100.$$

Приведённая погрешность γ (в процентах) – отношение абсолютной погрешности ΔA к нормирующему значению $A_{ном}$:

$$\gamma = (\Delta A/A_{ном})100.$$

Для приборов с нулевой отметкой на краю или вне шкалы нормирующее значение равно конечному значению диапазона измерений.

По характеру проявления, зависимости от текущего значения, режима измерения и условиям возникновения погрешности средств измерения подразделяют на систематические и случайные, аддитивные и мультипликативные, статические и динамические, основные и дополнительные.

Систематическая погрешность – погрешность, остающаяся постоянной или изменяющаяся по определенному закону. Ее значение всегда можно учесть введением соответствующих поправок.

Случайные погрешности – погрешности, изменяющиеся как случайная величина. Эти погрешности нельзя исключить опытным путем.

Аддитивные погрешности не зависят от значения измеряемой величины в пределах диапазона измерения. Источником их могут быть шумы элементов схемы, напряжение смещения в усилителях постоянного тока, внешние выходы и утечки в схемах, термоэдс и др.

Мультипликативные погрешности пропорциональны текущему значению измеряемой величины. Источником их является неста-

бильность коэффициентов передачи отдельных функциональных узлов средств измерений.

Статические погрешности возникают при измерении постоянной во времени измеряемой величины (измерение постоянного напряжения, частоты переменного тока и т. д.).

Динамические погрешности возникают при измерении изменяющихся во времени величин. Причиной их возникновения является инерционность средств измерений.

Основные погрешности – погрешности средств измерений при нормальных условиях эксплуатации, т. е. при нормируемой стандартами температуре внешней среды, влажности, атмосферном давлении, напряжении и частоте питания, внешних электрических и магнитных полях и др.

Дополнительная погрешность – погрешность, возникающая при отклонении одной или более влияющих величин от нормального значения.

Для сопоставления средств измерений, предназначенных для измерения одной и той же физической величины, служит понятие класса точности, который является обобщенной характеристикой, определяемой пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами, влияющими на точность, значения которых устанавливают в стандартах на отдельные виды средств измерений. Следует иметь в виду, что класс точности не является непосредственно показателем точности измерения.

Класс точности δ численно равен наибольшей допустимой приведенной основной погрешности в процентах, т. е. $\delta = \gamma_{\max}$. Для приборов, аддитивная погрешность которых резко преобладает над мультипликативной, класс точности выражается одним числом. Согласно ГОСТ 8.401-81 для них устанавливаются следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется абсолютной, относительной и приведенной погрешностью?
2. Какие существуют погрешности по характеру их проявления?

4. АНАЛОГОВЫЕ ПРИБОРЫ

В качестве аналоговых приборов используются электромеханические преобразователи – измерительные механизмы, входной величиной которых является электрическая величина (I , U), а выходной – перемещение указателя (α). В измерительном механизме происходит преобразование изменения энергии магнитного либо электрического поля в механическую работу [2; 5].

Главными узлами являются преобразователь энергии, компенсирующее устройство и указатель (счетное устройство).

Основными приборами, используемыми в практике измерений, являются магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, ферродинамические, индукционные, электростатические, тепловые, выпрямительные приборы.

4.1. Магнитоэлектрические приборы

Механизм магнитоэлектрического прибора, показанный на рис. 1,а, представляет собой рамку 1 с площадью s , осью вращения o и обмоткой w , по которой проходит ток, находящуюся в равномерном поле 2 магнитного потока Φ . Энергия магнитного поля – W_c . В результате взаимодействия поля тока I и потока Φ возникает вращающий момент M_3 , уравновешиваемый моментом 3 пружины M_{np} с жесткостью W [9]:

$$M_3 = dW_c/d\alpha = d\Phi_1/d\alpha = d(BswI\alpha)/d\alpha = W\alpha = M_{np},$$

откуда $\alpha = BswI/W = CI$.

Чувствительность прибора:

$$S = \frac{Bsw}{W}.$$

Магнитоэлектрические приборы весьма дороги в производстве и применяются в качестве образцовых, так как имеют высокую точность.

В качестве щитовых приборы, как правило, не используются, потому что боятся вибрации и действия магнитных полей.

Эти приборы при миниатюризации позволили создать малоинерционные магнитоэлектрические вибраторы (шлейфы) для регистрации быстроменяющихся процессов оптическим способом.

В сочетании с выпрямительными устройствами они используются в выпрямительных приборах для измерения переменного тока. Приборы имеют равномерную шкалу.

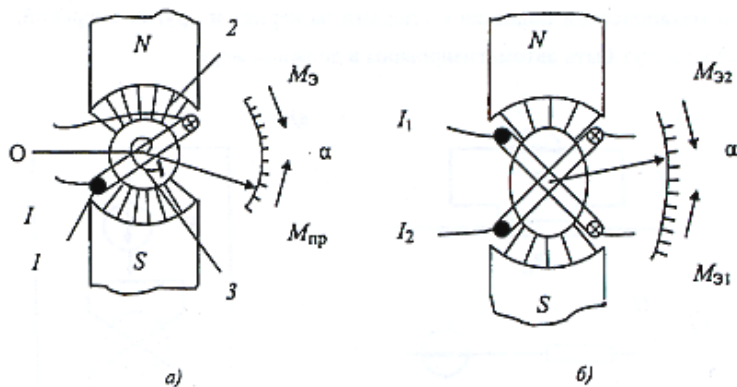


Рис. 1. Магнитоэлектрический прибор (а); логометр (б)

В логометрическом механизме противодействующий момент создается электрическим способом. Токи I_1, I_2 подводятся к скрепленным под углом рамкам через безмоментные токопроводы.

В магнитоэлектрическом логометре (рис. 1, б) действуют моменты

$$M_{э1} \text{ и } M_{э2}; M_{э1} = s_1 w_1 F_1(\alpha) \text{ и } M_{э2} = s_2 w_2 F_2(\alpha),$$

где $F_1(\alpha)$ и $F_2(\alpha)$ — функции изменения индукции в зазоре при перемещении рамок.

При равновесии моментов угол поворота:

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right).$$

В приборах на большие токи используются шунты. Амперметры с шунтом представляют собой милливольтметры, измеряющие падение напряжения на шунте (рис. 2, а). Для построения вольтметра на базе магнитоэлектрического механизма измеряемое напряжение должно быть преобразовано в пропорциональный ему ток. Для этого последо-

вательно с измерительным механизмом включают добавочный резистор R_d (рис. 3,б). Значение сопротивления для измерения напряжения U определяется по формуле

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

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

Амперметры и вольтметры имеют линейные шкалы и часто используются как образцовые приборы. Наличие логометра в омметре (рис. 2,в) исключает влияние источника питания на показания прибора.

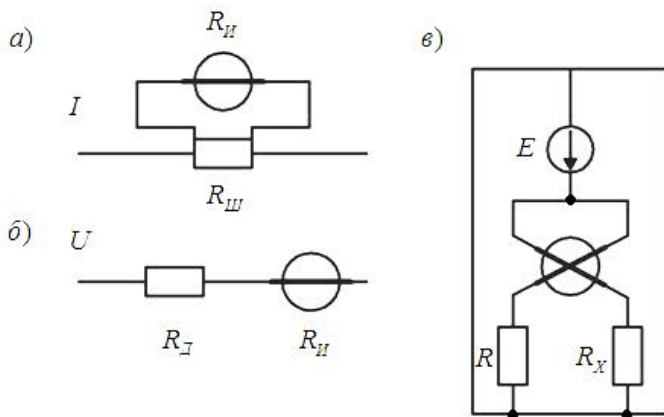


Рис. 2. Схемы магнитоэлектрических приборов:
 а – амперметров; б – вольтметров; в – омметров

Магнитоэлектрические приборы имеют высокую чувствительность, малое потребление тока, плохую перегрузочную способность, высокую точность измерений. Эти приборы весьма дороги в производстве, так как требуют изготовления подвижной рамки с достаточно тонким проводом, сложной механической подвески с опорами на кернях и других операций, которые не могут быть автоматизированы в должной мере.

Богатая номенклатура магнитоэлектрических приборов приведена в соответствующих справочниках по электроизмерительным приборам.

4.2. Электромагнитные приборы

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 [9].

Электромагнитный механизм (рис. 3) имеет поворотный якорь 1 с осью вращения O и пружиной 3, расположенный в зазоре магнитопровода 2, взаимодействующий с магнитным потоком Φ переменного тока I . При протекании тока через катушку возникает магнитное поле, которое, воздействуя на поворотный якорь, стремится расположить его так, чтобы энергия поля была наибольшей.

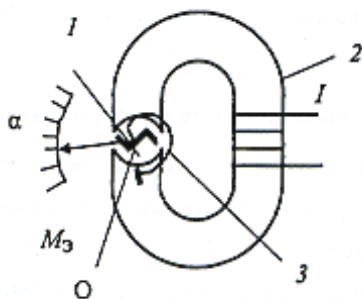


Рис. 3. Электромагнитный механизм

Электромагнитная энергия катушки с током:

$$W_e = 0,5LI^2.$$

Момент вращения:

$$M_э = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{0,5 I^2 dL}{d\alpha}$$

уравновешивается моментом пружины M_{np} , поэтому угол поворота

$$\alpha = \frac{0,5W I^2 dL}{d\alpha}.$$

Шкала нелинейная и определяется $L(\alpha)$ и I^2 .

Электромагнитный логометр (рис. 4) имеет два магнитопровода 2, 4 и два якоря 1, 6. Каждый магнитопровод имеет катушки 3, 5 с токами I_1 и I_2 . Якори при повороте подвижной части увеличивают индуктивность одной катушки и уменьшают индуктивность другой, поэтому моменты противоположны. При равновесии $M_1 = M_2$ или $0,5 I_1^2 dL_1 = 0,5 I_2^2 dL_2$.

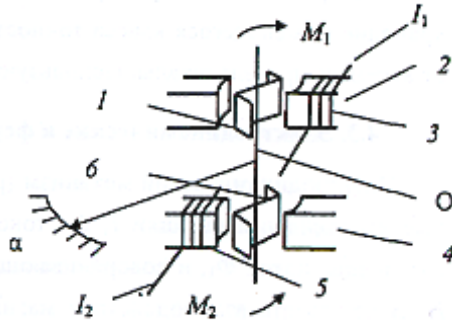


Рис. 4. Электромагнитный логометр

Тогда

$$\frac{I_1}{I_2} = F(\alpha).$$

Электромагнитные механизмы имеют неравномерные шкалы, и отклонение указателя не зависит от направления тока. Используются преимущественно для измерений переменного тока, показывают действующее значение. Эти приборы просты и дешевы. Имеют невысокую чувствительность, простую конструкцию, так как отсутствует подвижная рамка с токоподводами.

Для изменения чувствительности используются вместе с трансформаторами тока. Эти механизмы имеют большое потребление тока, высокую перегрузочную способность.

Используются как амперметры, вольтметры, фазометры, частотомеры для технических измерений.

Схемы амперметра и вольтметра с использованием электромагнитного механизма показаны на рис. 5.

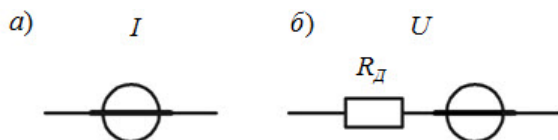


Рис. 5. Схемы электромагнитного амперметра (а) и вольтметра (б)

Электромагнитные приборы имеют нелинейную шкалу. Измерения с сохранением имеющегося класса точности возможны в диапазоне около 60% от верхнего предела шкалы. Используются как щитовые приборы,

4.3. Электродинамические и ферродинамические приборы

Электродинамический механизм (рис. 6) представляет собой две соосные неподвижные катушки 1, 2 с током I_1 , включенные последовательно и создающие поток Φ_1 , и поворачивающуюся катушку 3, по которой идет ток I_2 . В результате взаимодействия магнитных полей токов I_1 и I_2 возникает вращающий момент [9].

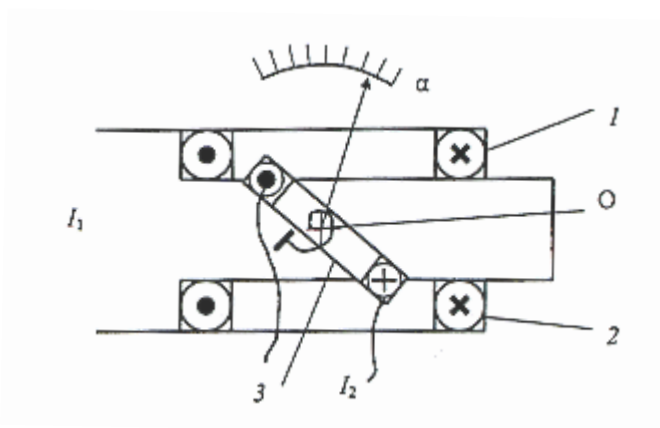


Рис. 6. Электродинамический механизм

Электродинамический механизм обладает той важной особенностью, что реагирует не только на произведение токов, но и на фазовый угол между ними, что позволяет на основе его создавать приборы для

измерения мощности – ваттметры, а также амперметры и вольтметры высокой точности для измерений переменного и постоянного тока.

Электромагнитная энергия двух контуров:

$$W_e = 0,5 L_1 I_1^2 + 0,5 L_2 I_2^2 + I_1 I_2 M_{1,2}.$$

Момент:

$$M = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{I_1 I_2 dM_{1,2}}{d\alpha} = W\alpha,$$

где W – жесткость пружины.

Отклонение указателя равно:

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 dM_{1,2} / d\alpha = CI_1 I_2 F(\alpha).$$

Вследствие этого одновременное изменение направлений токов не меняет отклонения указателя (поэтому электродинамические приборы применяются на постоянном и переменных токах), а характер шкалы нелинейный.

На переменном токе вследствие инерционности механизм измеряет среднее значение момента:

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{T} \int_0^T M_i dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_{1m} I_{2m} \sin \omega t \sin(\omega t - \Psi) dM_{1,2} / d\omega t = \\ &= I_1 I_2 \cos \Psi dM_{1,2} / d\alpha, \end{aligned}$$

где Ψ – угол сдвига фаз между токами I_1 и I_2 .

Поэтому на постоянном токе $\alpha = F(\alpha) I_1 I_2$, на переменном токе $\alpha = CI_1 I_2 \cos \Psi$.

Ферродинамический механизм имеет магнитопровод, в катушке которого протекает ток I_1 , а подвижная катушка с током I_2 перемещается в равномерном магнитном поле.

Следовательно, на переменном токе:

$$\alpha = C I_1 I_2 \cos \Psi.$$

Электродинамический логометр имеет две подвижные катушки, скрепленные друг с другом под углом, и безмоментный токоподвод. По неподвижным катушкам протекает ток I , по подвижным – токи $I_1 I_2$.

В результате взаимодействия магнитных полей имеем:

$$F(\alpha) = \frac{I_2 \cos \Psi_2}{I_1 \cos \Psi_1},$$

где Ψ_2 – угол между I_2 и I ; Ψ_1 – угол между I_1 и I .

Таким образом, приборы этих двух систем в цепях переменного тока обладают важным качеством реагирования не только на произведение токов, но и на фазовый угол между токами.

На рис. 7 приведены схемы ваттметра и амперметра электродинамической системы.

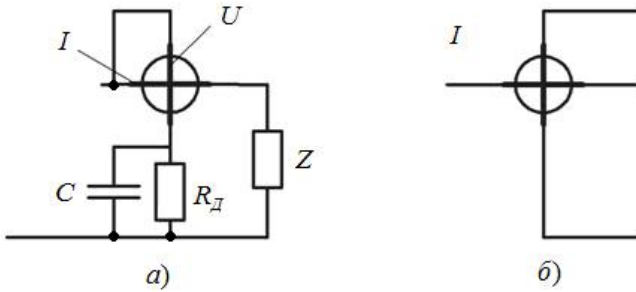


Рис. 7. Схемы электродинамического ваттметра (а) и амперметра (б)

Шкалы амперметра и вольтметра электродинамической системы близки к квадратичным: $\alpha_A = F(\alpha)I^2$ и $\alpha_V = F(\alpha)U^2$.

У аналогичных приборов ферродинамической системы шкалы квадратичны: $\alpha_A = CI^2$ и $\alpha_V = CU^2$.

Угол поворота указателя ваттметра на постоянном токе:

$$\alpha = CUI = CI^2.$$

Для этого R_d шунтируется емкостью C . Зажимы токовой обмотки I и обмотки напряжения U у ваттметров имеют разметку для правильного включения.

Для расширения пределов используются трансформаторы тока и напряжения.

Электродинамические и ферродинамические приборы обладают невысокой чувствительностью, большим потреблением тока, имеют чувствительность к перегрузкам и высокую точность измерений. У амперметров и вольтметров нелинейные шкалы. Важной положительной особенностью электродинамических ваттметров являются одинаковые показания на постоянном и переменном токах, что позволяет просто поверять их. Это качество электродинамических и ферродинамических ваттметров широко используется в практике поверки шкал приборов

в условиях электролаборатории. Электродинамические приборы используются как лабораторные показывающие приборы, ферродинамические – как регистрирующие, так как имеют большой момент для перемещения пишущего устройства.

4.4. Индукционные приборы

Индукционные приборы чаще всего используются как счетчики энергии и выполняют в разных вариантах учет и измерение расхода электроэнергии и мощности [9].

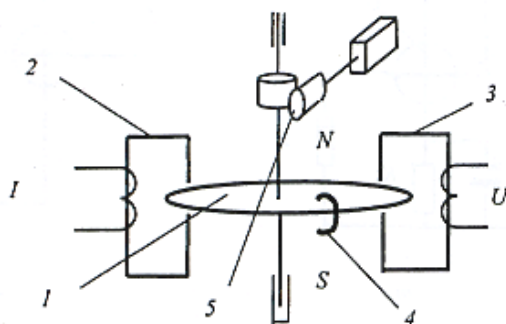


Рис. 8. Индукционный механизм

Индукционный механизм, показанный на рис. 8, представляет собой вращающийся диск из немагнитного металла 1, магнитопроводы обмоток тока и напряжения 2, 3, тормозной магнит 4 и счетный механизм с устройством передачи вращения от диска 5. В случае использования противодействующей пружины и контактов, замыкающихся при определенном угле поворота заторможенного диска, индукционный механизм представляет собой реле мощности. Простейший индукционный механизм имеет две магнитные системы – тока и напряжения с разными сопротивлениями обмоток. Токи обмоток I и напряжение U , сдвинутые по фазе на угол φ , создавая соответствующие магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , наводят в диске эллиптические индукционные токи I_1 и I_2 , которые перекрестно взаимодействуют с магнитными потоками – ток I_1 с потоком Φ_2 , а I_2 – с потоком Φ_1 , создавая вращающий момент $M_{вр} = K_1 I_1 I_2 \cos\varphi$. Тормозной момент, создаваемый постоянным магни-

том: $M_T = K_2 d\alpha/dt$. Установившаяся скорость вращения в этом случае: $\omega = d\varphi/dt = KI_1I_2\cos\varphi$, т. е. $d\varphi = KUI\cos\varphi dt = KPdt$.

Интегрируя, имеем расход электроэнергии:

$$E = \int_0^{\varphi} d\varphi = 2\pi N / K = CN,$$

где C – постоянная счетчика.

Число оборотов N_0 диска I при расходе энергии 1 кВтч называют передаточным числом. Передаточное число всегда указывается на счетчике.

Индукционный счетчик характеризуется постоянной $C_{НОМ}$, которая определяется числом оборотов диска N_0 на 1 кВтч энергии, указанным на счетчике:

$$C_{НОМ} = \frac{1 \text{ кВтч}}{N_0} = \frac{36 \cdot 10^5}{N_0} \text{ (Втс/об)}.$$

Индукционные приборы характеризуют невысокая чувствительность, значительное потребление тока, нечувствительность к перегрузкам. Преимущественно они служат счетчиками энергии переменного тока.

Такие приборы выпускаются одно-, двух- и трехэлементными для работы в однофазных, трехфазных трехпроводных и трехфазных четырехпроводных с нулевым проводом цепях. Для расширения пределов используются трансформаторы тока и напряжения.

4.5. Электростатические приборы

Электростатический механизм показан на рис. 9,а. Перемещение подвижной части прибора происходит под действием электростатических сил и связано с изменением емкости системы неподвижного 2 и подвижного 1 электродов.

Пружина 3 создает противодействующий момент. Под действием подведенного к электродам напряжения U создается электрическое поле. Силы электрического поля стремятся повернуть подвижную часть так, чтобы энергия электрического поля была наибольшей, т. е. чтобы подвижный электрод втягивался в пространство между неподвижными электродами и поворачивал указатель. Подвижная часть может быть укреплена на опорах, растяжках или подвесе, а в качестве указателя кроме стрелки применяют также световой луч. Электроды изготавливают из алюминия.

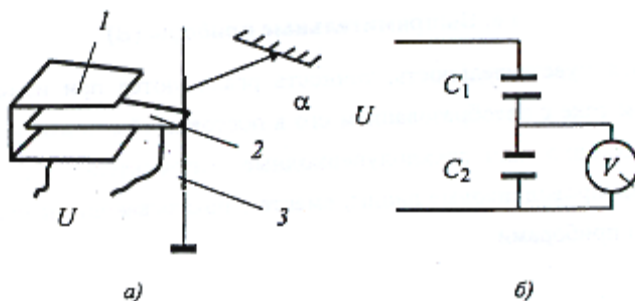


Рис. 9. Электростатический механизм (а) вольтметр (б)

Электростатические приборы весьма дорогостоящие и используются для измерений высоких напряжений, когда требуется обеспечить малое потребление мощности прибором. Они очень чувствительны к вибрациям и не используются в качестве щитовых приборов. Являются лабораторными приборами для специального применения.

Энергия электростатического поля:

$$W_e = 0,5CU^2.$$

Момент равен:

$$M = dW_e/d\alpha = 0,5U^2dC/d\alpha.$$

При равновесии и жесткости пружины W :

$$\alpha = 0,5WU^2dC/d\alpha = F(\alpha)U^2.$$

Шкала прибора линеаризуется изменением формы электродов. Приборы этой системы характеризуются малым потреблением переменного тока и нулевым на постоянном токе. Эти приборы имеют невысокую чувствительность, но чувствительны к перегрузкам и служат для измерения напряжения на постоянном и переменном токе. Для расширения пределов используются емкостные и резистивные делители.

Вольтметр с емкостным делителем показан на рис. 9,б. Добавочные емкости в нем не применяются в связи с тем, что на переменном токе емкость вольтметра изменяется от показаний, и потери в емкости зависят от частоты, что вносит погрешность в измерения.

4.6. Выпрямительные приборы

Высокая чувствительность, точность реализуются при измерениях на переменном токе с преобразованием его в постоянный с помощью схем, использующих одно- или двухполупериодные выпрямители, обычно применяющие полупроводниковые диоды вместе с показывающими магнитоэлектрическими приборами [9; 10].

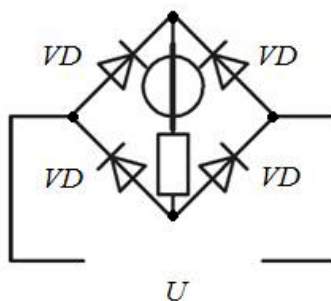


Рис. 10. Выпрямительный вольтметр

Для двухполупериодной схемы выпрямления на рис. 10 средний за период вращающий момент выпрямительного прибора равен

$$M_{cp} = CI_{cp} = \frac{2}{\pi} I_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I.$$

Для синусоиды коэффициент формы

$$K_{\phi} = \frac{I}{I_{cp}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Поэтому для двухполупериодной схемы поворот указателя

$$\alpha = \frac{CI}{K_{\phi}} = C_1 I.$$

Выпрямительные приборы градуируют на переменном токе.

Погрешность измерений возникает при несинусоидальном токе. Обычно эти приборы используются в универсальных измерительных приборах – вольтметрах, амперметрах, омметрах.

4.7. Термоэлектрические приборы

Термоэлектрические приборы состоят из нагревателя – проводника повышенного сопротивления, по которому проходит ток I , и термопары, соединенной с нагревателем. Схема термоэлектрического амперметра показана на рис. 11. ТермоЭДС, создаваемая термопреобразователем, пропорциональна количеству теплоты, выделенной током в спаяе, которая, в свою очередь, пропорциональна I^2 [9; 11]:

$$\varepsilon = KI^2 = I_u R.$$

Для магнитоэлектрического прибора – измерителя тока:

$$\alpha = CI \quad И = \frac{IKI^2}{R} = CI^2.$$

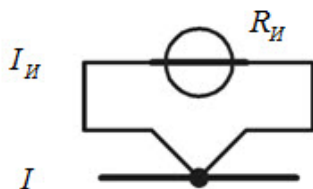


Рис. 11. Термоэлектрический амперметр

Термоэлектрические приборы имеют низкую чувствительность, плохую перегрузочную способность, невысокую точность и нелинейность шкалы. Измеряют действующее значение тока в широком диапазоне частот. Для расширения пределов амперметров используются высокочастотные трансформаторы тока.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие типы аналоговых приборов используются в энергоснабжении?
2. Принцип действия магнитоэлектрических приборов, сфера их применения.
3. Принцип действия электромагнитных приборов, сфера их применения.
4. Почему в качестве щитовых приборов чаще всего используются электромагнитные приборы?

5. Принцип действия электродинамических приборов, сфера их применения.
6. Принцип действия ферродинамических приборов, сфера их применения.
7. Чем отличаются электродинамические приборы от ферродинамических?
8. Почему ферродинамические приборы нашли широкое применение в самопишущих устройствах?
9. Принцип действия индукционных приборов.
10. Где в основном применяются индукционные приборы, из скольких элементов они могут состоять?
11. Принцип действия электростатических приборов, сфера их применения.
12. Для измерения какой электрической величины используются электростатические приборы?
13. Сфера применения выпрямительных приборов.
14. На каком токе градуируют выпрямительные приборы?
15. Принцип действия термоэлектрических приборов, сфера их применения.

5. МАСШТАБИРУЮЩИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Простейшими преобразователями токов и напряжений, позволяющими изменять пределы измерений амперметров, вольтметров и других приборов, являются шунты, добавочные сопротивления и трансформаторы тока и напряжения [6; 12].

Для амперметра (рис. 12,а), представляющего собой измеритель тока I_H с сопротивлением R_H и шунтом $R_{ш}$, который показан:

$$R_{ш} = \frac{R_H}{(I/I_H - 1)}; \quad I = I_H(R_H/R_{ш} + 1)$$

Для вольтметра с добавочным сопротивлением R_D (рис. 12,б):

$$R_D = R_H \left(\frac{U}{U_H} - 1 \right); \quad U = U_H \left(\frac{R_D}{R_H} + 1 \right).$$

Шунты характеризуются номинальным током $I_{ш. ном}$ и падением напряжения $U_{ш. ном}$. В этом случае $R_{ш. ном} = \frac{U_{ш. ном}}{I_{ш. ном}}$.

Шунты калиброваны по напряжению.

Согласно стандартам напряжение $U_{ш. ном}$ измеряется от 10 до 300 мВ для различных номинальных токов.

Шунты имеют две пары зажимов: токовые и потенциальные для подключения измерительного прибора к силовой цепи. Применяются преимущественно с магнитоэлектрическими приборами.

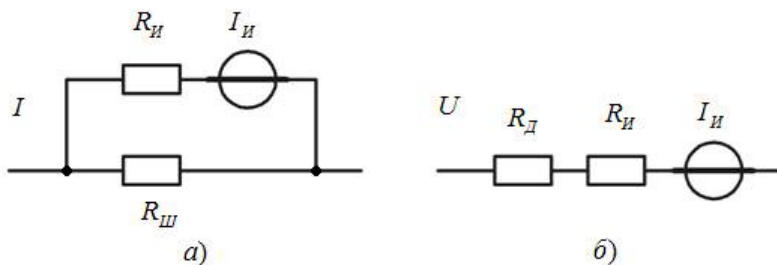


Рис. 12. Амперметр (а) и вольтметр с добавочным сопротивлением (б)

Классы точности шунтов от 0,02 до 0,5. Серийно выпускаются на ток не более 5 кА.

Добавочные сопротивления характеризуются номинальным током $I_{д. ном}$ и напряжением $U_{д. ном}$. Калиброванные добавочные сопротивления применяются с измерителем тока, номинальный ток которого $I_{д. ном}$. Классы точности — от 0,01 до 1,0 для различных $I_{д. ном}$ от 0,5 до 30 мА. Выпускаются на напряжение не выше 30 кВ.

Шунты и добавочные сопротивления не решают задачи гальванического разделения силовой и измерительной цепей, что необходимо для безопасного обслуживания приборов.

Трансформаторы тока (ТТ) (рис. 13,а) и **напряжения (ТН)** (рис. 13,б) гальванически изолируют силовую и измерительную цепи и преобразуют уровни токов и напряжений, обеспечивая безопасность обслуживания приборов.

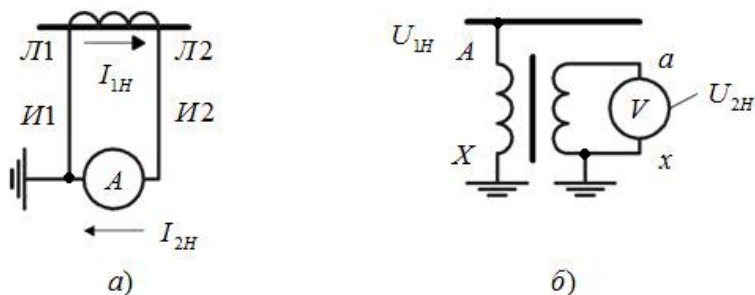


Рис. 13. Трансформаторы тока (а) и напряжения (б)

Они представляют собой трансформаторы с малыми потерями, работающие в режимах короткого замыкания, либо холостого хода вторичной обмотки, имеющие стабильный коэффициент трансформации в широкой полосе частот.

Токовым и угловым погрешностям трансформаторов посвящена специальная литература (Дьяконов А.Ф., Овчаренко Н.И. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем. — М.: Изд-во МЭИ, 2010. — 336 с.).

Для трансформаторов тока регламентируется сопротивление вторичной цепи, для трансформаторов напряжения — мощность, при которой измерения не выходят за пределы класса точности.

Трансформаторы тока характеризуются номинальным первичным током I_{1H} и вторичным I_{2H} , который равен 1 или 5 А. В этом случае коэффициент трансформации $K_I = \frac{I_{1H}}{I_{2H}}$. Первичная обмотка обозначается Л1, Л2, вторичная – И1, И2. Классы точности лабораторных трансформаторов тока 0,1 и 0,5. Номинальная нагрузка вторичной цепи от 0,1 до 0,4 Ом. Выпускаются на токи до 2 кА. С секционированной первичной обмоткой можно проводить измерения при различных токах в первичной цепи.

Трансформаторы напряжения характеризуются номинальным первичным напряжением U_{1H} и вторичным U_{2H} , равным 100 В или $100/\sqrt{3}$ В. Коэффициент трансформации $K_U = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}$. Первичная обмотка обозначается А, Х, вторичная – а, х. Классы точности лабораторных трансформаторов напряжения – 0,1; 0,2. Номинальная нагрузка вторичной цепи – не более 15 ВА. Серийные трансформаторы имеют в лабораторном исполнении первичное напряжение до 15 кВ. Обширная номенклатура трансформаторов тока и напряжения позволяет выбрать их для различных случаев установки.

Трансформаторы тока и напряжения позволяют унифицировать приборы – использовать амперметры на 1 либо 5 А и вольтметры на 100 или $100/\sqrt{3}$ В для измерений больших токов и высоких напряжений.

Секционированная первичная обмотка позволяет измерять различные напряжения. Номенклатура трансформаторов тока и напряжения разнообразна и приведена в соответствующих справочниках.

В случае включения трансформаторов тока и напряжения для измерений в однофазной сети показания $I_H = K_I I_u$, $U_H = K_U U_u$.

Совместное использование трансформаторов тока и напряжения позволяет применять высокочувствительные магнитоэлектрические вибраторы светолучевых осциллографов для регистрации процессов.

Магнитоэлектрический вибратор по принципу действия ничем не отличается от магнитоэлектрического прибора и описан далее как регистрирующий прибор, так как используется для регистрации процесса оптическим способом на светочувствительную пленку.

При регистрации тока выбирают ТТ с нужным K_I и известными I_{2H} , R_{2H}

Вибратор выбирается с сопротивлением шлейфа $R_{шл}$, током отклонения $I_{шл}$ и необходимой полосой частот. Схема вибратора приведена на рис. 14. Необходимые резисторы R_1 , R_2 обычно выполняются в виде магазинов сопротивлений и рассчитываются по приближенным формулам:

$$R_2 = (I_{2H} R_{2H} / I_{шл}) - R_{шл} \cong (I_{2H} R_{2H}) / I_{шл};$$

$$R_1 = I_{2H} R_{2H} / (I_{2H} - I_{шл}) \cong R_{2H}.$$

Для точного масштабирования используют переменные резисторы, усложняющие измерительные схемы и нагружают вторичную цепь известным током для точного определения масштаба преобразования:

$$R_1 = (U_{2H} - I_{шл} R_{шл}) / I_{шл} \cong U_{2H} / I_{шл}.$$

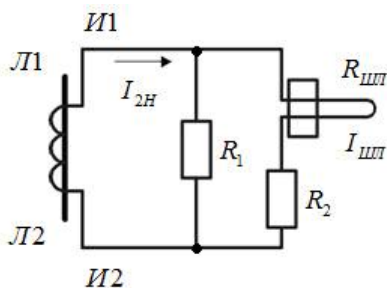


Рис. 14. Схема включения вибратора осциллографа с трансформатором тока

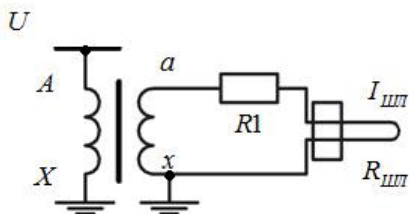


Рис. 15. Включение вибратора с трансформатором напряжения

При регистрации напряжения выбирается ТН с необходимым K_U и известным U_{2H} . Аналогично выбирается вибратор $I_{шл}$, $R_{шл}$, схема которого показана на рис. 15. Резистор R_1 определяется как

$$R_1 = (U_{2H} - I_{шл} R_{шл}) / I_{шл} \approx U_{2H} / I_{шл}.$$

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего используются шунты, на какие классы точности и токи они выпускаются?
2. Для чего используются добавочные сопротивления, на какие классы точности и токи они выпускаются?
3. Для какой цели используются трансформаторы тока и напряжения?
4. Каковы номинальные значения токов вторичных обмоток трансформаторов тока?
5. Каковы номинальные значения напряжений во вторичных обмотках трансформаторов напряжения?
6. Какие значения регламентируются в трансформаторах тока и напряжения, для того чтобы измерения не выходили за пределы класса точности?

6. РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

При эксплуатации и проведении энергетического аудита необходимо знать не только значение, но и изменение величины во времени.

Для решения этой задачи широко применяются регистрирующие приборы прямого действия, в которых счетное устройство оснащается дополнительно устройством, осуществляющим запись измеряемого процесса на перемещаемый носитель.

Такие регистрирующие приборы называются самописцами и подразделяются на обычные, записывающие процессы с частотой менее 1 Гц, и быстродействующие – с частотой более 1 Гц [5; 6].

Сюда же относится и быстродействующий регистратор – светолучевой осциллограф, использующий магнитоэлектрический измерительный механизм – вибратор, записывающий процесс на фотобумагу световым лучом. Другие регистрирующие приборы с записью на магнитную ленту (магнитографы) используются только в исследовательских целях.

В регистрирующих приборах прямого действия применяют только магнитоэлектрические или ферродинамические измерительные механизмы с низкочастотными и электромагнитными поляризованными механизмами для высокочастотных приборов.

Использование магнитоэлектрических и, что бывает чаще, ферродинамических механизмов приборов вызвано необходимостью получить большой вращающий момент, который должен преодолеть дополнительное трение в регистрирующем устройстве.

Электрические схемы регистрирующих приборов аналогичны магнитоэлектрическим и ферродинамическим приборам.

Регистрирующий прибор с ферродинамическим механизмом 1, показанный на рис. 16, имеет указатель 3 с расположенным на нём пером, куда по капилляру из резервуара 2 подаются специальные чернила. Лентопротяжное устройство 4 обеспечивает движение бумаги.

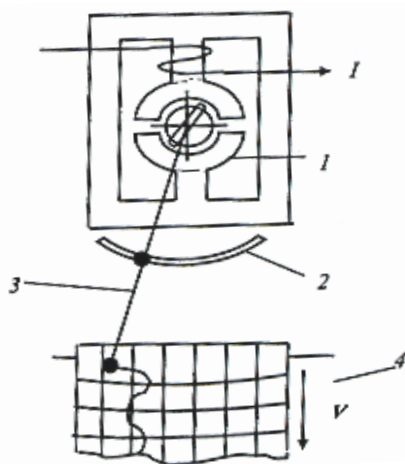


Рис. 16. Регистрирующий ферродинамический прибор

Низкочастотный прибор прямого действия использует самый простой способ регистрации на бумажную ленту с криволинейными координатами.

Существует большая группа приборов, использующих регистрацию на носителе снятием с него специального слоя, нанесением пасты, а также многоканальную запись на магнитный носитель.

Регистрирующим приборам присущи все качества тех механизмов, которые в них имеются, однако точность ухудшается из-за влияния трения регистрирующего устройства. Регистрирующие приборы: амперметры, вольтметры, ваттметры и варметры, фазометры – обычно предназначены для одноканальной записи.

Быстродействующие регистрирующие приборы, не имеющие указателей, записывают ток и напряжение и выполняются как одно- так и многоканальными.

Регистрирующий прибор с магнитоэлектрическим механизмом, позволяющим записывать сигнал на носитель (фотопленку) световым лучом в широком диапазоне скоростей протяжки и многоканальном исполнении, называется светолучевым (шлейфным) осциллографом.

Малоинерционный магнитоэлектрический механизм (вibrator, шлейф) представляет собой миниатюрный аналог магнитоэлектрического прибора, где указатель заменен световым лучом.

Светолучевые осциллографы обычно предназначаются для кратковременной работы из-за ограниченного запаса носителя и высокой скорости протяжки.

Устройство шлейфа показано на рис. 17. Оно состоит из рамки 2, по которой через гибкие токоподводы проходит ток I . Рамка крепится на растяжках 1. На зеркальце 3 от осветителя 5 через оптическое устройство 4 падает луч света, и, отражаясь от зеркальца, попадает на движущуюся пленку 6.

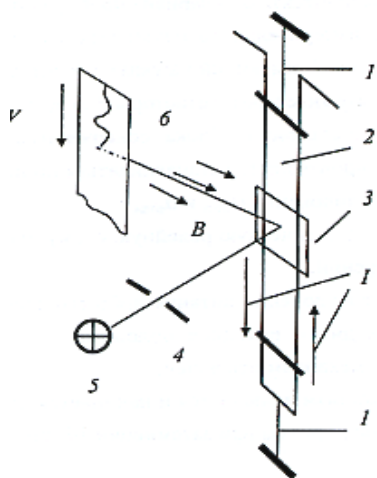


Рис. 17. Магнитоэлектрический вибратор (шлейф)

Магнитное поле B создается постоянным магнитом.

Таким образом, шлейф по принципу действия аналогичен магнитоэлектрическому механизму, но благодаря малому моменту инерции, вследствие миниатюрного выполнения, позволяет регистрировать процессы изменения тока в широкой полосе частот, достигающей десятков килогерц. Простейшие светолучевые осциллографы в качестве носителя информации используют как фотопленку, требующую проявления, так и специальную пленку, проявляющуюся на свету, что крайне удобно, так как результат записи процесса может быть получен сразу и зафиксирован.

Светолучевые осциллографы являются многоканальными приборами, способными иметь до 24 каналов измерений.

Заметим, что в случае использования осциллографа для регистрации процессов со значительными электромагнитными полями, возникающими при исследовании процессов коммутации силовых цепей, требуется экранировка цепей шлейфов – использование коаксиальных кабелей либо бифилярно выполненных проводов, уменьшающих наводки паразитных электромагнитных сигналов.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие приборы называются регистрирующими?
2. Что называется обычным самописцем?
3. Что называется быстродействующим самописцем?
4. Принцип действия регистрирующих приборов. Сфера их применения.
5. Какая роль магнитоэлектрического вибратора в осциллографе?
6. Что такое шлейф?
7. Для чего требуется экранирование цепей шлейфов?

7. КОНТАКТНЫЕ ПРИБОРЫ

При установке на указатель – стрелку измерительного механизма подвижного контакта, а на шкалу – перемещаемых произвольно левого и правого контактов (ЛК, ПК), получаем контактный прибор, обладающий функциями измерения, сигнализации, регулирования и регистрации.

В современных приборах это реализуется в бесконтактном выполнении, поскольку вращающие моменты невелики и контактные варианты трудно реализуемы. Бесконтактный вариант прибора показан на рис. 18.

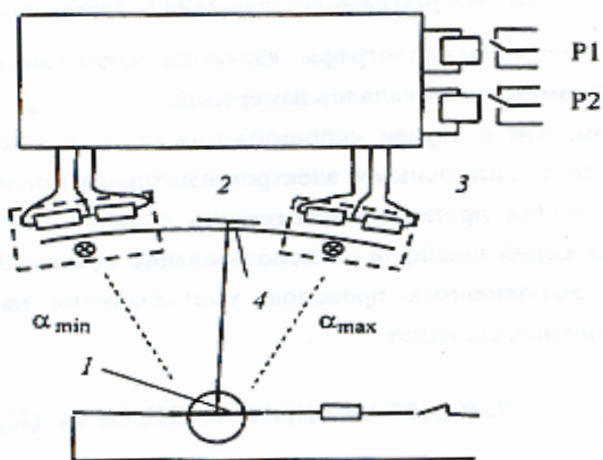


Рис. 18. Контактный прибор с оптическими контактами

В качестве измерительного механизма используется, в принципе, прибор любой системы I , имеющий на указателе шторку 4 , которая в положениях α_{min} и α_{max} затемняет фоторезисторы 3 левого и правого контактов. Каждый из контактов состоит из блока, содержащего осветитель 2 и фоторезисторы, и может произвольно устанавливаться по шкале, определяя зоны сигнализации и регулирования α_{min} и α_{max} . При-

бор имеет логическую релейную схему для выполнения следующего алгоритма измерений.

1. В момент включения питания либо его восстановления прибор автоматически приходит в исходное положение: реле P1, P2 обесточены, стрелка на нуле, механизм отключен.

2. Далее механизм включается и начинается прохождение стрелки вправо, в зону «норма», причем при затемнении ЛК реле обесточены.

3. При затемнении ЛК и ПК срабатывают реле P1, P2, отмечая прохождение α_{\min} и α_{\max} .

4. В зоне «норма» реле P1, P2 отпускают.

При оснащении стрелки пером одновременно ведется регистрация.

Некоторые контактные приборы вместо стрелки имеют оптическую систему индикации со световым лучом, отражающимся от зеркала, и осветителем. Такие приборы называются узкопрофильными контактными приборами со световым указателем. Они сигнализируют об отклонении измеряемой величины изменением цвета и включением соответствующих реле.

Контактные приборы предназначаются для измерений, регистрации и регулирования токов и напряжений, активной и реактивной мощности, частоты, фазы в зависимости от используемого механизма и схемы.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется контактными приборами?
2. Где применяются контактные приборы?
3. Что называется узкопрофильными контактными приборами со световым указателем?

8. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В задачах измерений различных электрических и неэлектрических величин при эксплуатации и аудите энергетического оборудования, когда необходимо контролировать и регистрировать множество параметров, использование для этих целей такого же числа приборов приводит к непомерному увеличению размеров пультов управления.

Эти проблемы решаются с помощью агрегатного принципа построения средств электроизмерительной техники (АСЭТ) и построения государственной системы приборов (ГСП) [2; 7].

Принцип построения агрегатного многофункционального измерительного самопишущего прибора (ЭИСП) показан на рис. 19, где Пр – преобразователи измеряемых величин в постоянный ток; SA – переключатель; СП – регистрирующий прибор.

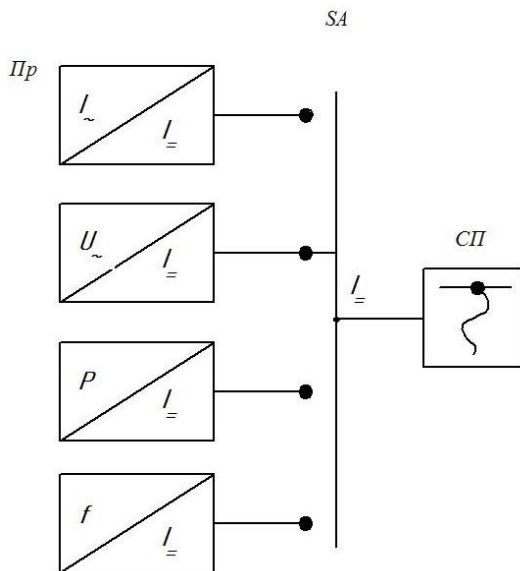


Рис. 19. Многофункциональный прибор с электронными аналоговыми преобразователями

Очевидно, преобразователи должны иметь линейные характеристики, а в качестве унифицированного сигнала стандарт определяет постоянный ток 5 или 20 мА и напряжение 1 или 10 В.

В АСЭТ входят узкопрофильные электроизмерительные приборы с механизмами выпрямительной и ферродинамической систем на переменном токе и магнитоэлектрической на постоянном, как обеспечивающие линейную характеристику преобразователя с фотоэлектрическим следящим устройством. В эту же систему входят электронные аналоговые преобразователи электрических величин серии Е, выполненные на операционных усилителях.

Аналоговые электронные преобразователи в качестве преобразователя используют микроэлектронные усилители с отрицательной обратной связью, которая придает особые свойства транзисторному усилителю, расширяя его полосу частот, увеличивая входное и уменьшая выходное сопротивления, а также стабилизируя коэффициент усиления и снижая влияние температуры на параметры транзисторов и коэффициент усиления.

Богатая номенклатура таких операционных усилителей позволяет создавать самые разнообразные аналоговые преобразователи различных электрических величин в постоянный ток. Малое выходное сопротивление операционного усилителя позволяет в качестве выходного прибора использовать унифицированный измеритель тока [10; 11].

Важной особенностью отрицательной обратной связи является то обстоятельство, что легко изменяется коэффициент усиления преобразователя – операционного усилителя, а это дает возможность масштабировать изменение входной величины и нормировать выходной сигнал.

В качестве усилителей постоянного тока с отрицательной обратной связью используются микроэлектронные структуры на основе кремния, что позволяет получить высокие метрологические показатели при малых габаритах, минимальном потреблении мощности и резком уменьшении влияния температуры.

Различные схемные решения аналоговых электронных измерительных преобразователей (АЭИП) позволяют создавать разные преобразователи с нормированным сигналом постоянного тока 5 мА или напряжения 10 В, которые могут использоваться как автономно, так и в составе информационно-измерительных систем.

АЭИП представляет собой 4- или 6-полюсники с линейной либо функциональной характеристикой «вход - выход», которые могут осуществлять вычислительные операции с входными сигналами.

Принципиальная блок-схема усилителя с отрицательной обратной связью (ООС) приведена на рис. 20. Здесь УПТ – усилитель с коэффициентом K ; ООС – отрицательная обратная связь с коэффициентом передачи β , создаваемая резисторами.

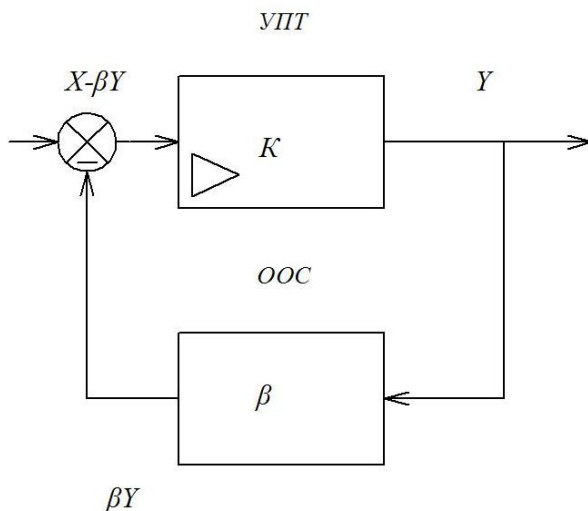


Рис. 20. Блок-схема усилителя с отрицательной обратной связью

Из соотношений этой блок-схемы следует:

$$K_{o.c} = Y/X,$$

$$Y = K(X - \beta Y);$$

$$K_{o.c} = \frac{K(X - \beta Y)}{X} = K(1 - \beta K_{o.c})$$

Или

$$K_{oc} = \frac{K}{(1 + \beta K)},$$

что при $K \rightarrow \infty$ означает

$$K_{oc} \approx 1/\beta.$$

Входное и выходное сопротивления становятся следующими:

$$R_{BX. OC} = R_{BX}(1 + \beta K);$$

$$R_{ВЫХ. OC} = \frac{R_{ВЫХ}}{(1 + \beta K)}.$$

Универсальный вольтметр АЭИП показан на рис. 21.

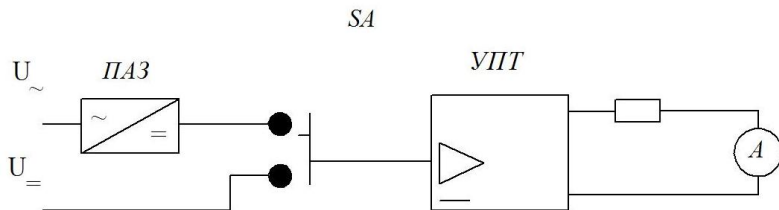


Рис. 21. Электронный вольтметр

Здесь ПАЗ – преобразователь амплитудного значения, УПТ – усилитель постоянного тока с обратной связью, SA – переключатель. Использование отрицательной обратной связи в усилителе повышает входное сопротивление и уменьшает выходное, как следует из вышеприведенных выражений.

Серийно выпускаемые аналоговые электронные преобразователи серий Е 700 и Е 800 предназначены для автоматизации энергоснабжения и для измерений различных электрических величин при управлении производственными процессами.

Преобразователи серии Е 800 предназначены для измерения электрических величин с преобразованием в нормированный сигнал постоянного тока 5 мА, выполнения вычислительных операций и формирования сигналов релейного характера. По назначению подразделяют на несколько групп.

Одноканальные Е 824–830 предназначены для преобразования $I_-, U_-, U, f, P_{3Ф}, Q_{3Ф}$ в выходной ток $I_{\text{вых}} = 5$ мА на $R_H = 0,1...2,5$ кОм с переменным коэффициентом усиления от 0,04 до 0,56.

Двухканальные преобразователи Е 817/2–821/2 предназначены для операций умножения, деления, возведения в квадрат, извлечения корня и логарифмирования входных сигналов постоянного тока с выходным сигналом $I_{\text{вых}} = 5$ мА на $R_H = 0,1... 2,5$ кОм.

Преобразователь постоянного тока Е 850 предназначен для контроля тока в режимах токовой перегрузки и формирования релейного сигнала $I_{\text{вых}} = 5 \text{ мА}$ при изменении тока во вторичной обмотке трансформатора тока с $I_{2H} = 5(1) \text{ А}$ от 1 I_{2H} до 8 I_{2H} .

Преобразователь Е 832 – для преобразования постоянного тока в частоту прямоугольных импульсов на одном выходе от 2 до 4 кГц, на другом – от 1 до 2 кГц при изменении $I_{\text{вх}} = 5 \text{ мА}$. Выходные импульсы U равны 1 либо 2 В со скажностью 2.

Перечень АИЭП серии Е 800 приведен в соответствующей литературе [10; 11], в которой приведены данные на одноканальные преобразователи среднеквадратичных тока $I_{\text{-СК}}$ и напряжения $U_{\text{-СК}}$ в постоянный ток, постоянного напряжения разного уровня в постоянный ток, частоты в постоянный ток, активной и реактивной мощностей трёхфазного тока в постоянный ток.

Промышленность выпускает суммирующий преобразователь от трех до десяти постоянных токов, двухканальный преобразователь активной и реактивной мощностей переменного тока в постоянные токи, функциональные преобразователи постоянных токов. Имеется также особый преобразователь постоянного тока в прямоугольные импульсы с амплитудой 1 и 2 В на разных выходах с частотой 2 или 4 кГц и 1 или 2 кГц.

Некоторые преобразователи этой серии не требуют внешнего источника питания и работают автономно, для большинства же нужен источник питания 220 В, 50 Гц. Потребление мощности не превышает 15 ВА.

Другая серия АЭИП Е 700 представляет собой группу преобразователей с выходным сигналом постоянного напряжения $U_{\text{вых}} = 10 \text{ В}$. Они уступают первой по возможностям и требуют источника питания 220 В, 400 Гц.

Все преобразователи имеют кассетное выполнение и позволяют создавать стойки измерительных приборов.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие электроизмерительные приборы входят в АСЭТ?
2. Что используют в качестве преобразователя аналоговые электронные преобразователи?
3. Что обеспечивает отрицательная обратная связь в усилителе?

9. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Цифровые электронные измерительные приборы преобразуют аналоговый входной сигнал в дискретный, представляя его в цифровой форме с помощью цифрового отсчётного устройства (ЦОУ), и могут выводить информацию на внешнее устройство – дисплей, цифропечать. Преимуществами электронных цифровых измерительных приборов (ЦИП) являются:

- автоматический выбор диапазона измерения;
- автоматический процесс измерения;
- вывод информации в коде на внешние устройства;
- представление результата измерений с высокой точностью.

Широкое применение ЦИП ограничивается следующими факторами:

- высокой стоимостью;
- влиянием климатических условий;
- необходимостью резервирования;
- необходимостью квалифицированного обслуживания.

Поэтому ЦИП применяются весьма ограниченно на главных щитах управления электростанций, крупных подстанциях и диспетчерских пунктах, и, в основном, используются как приборы с цифровой индикацией мощности, частоты, напряжения. Постоянное совершенствование ЦИП постепенно расширяет их возможности и увеличивает их долю в общем числе приборов для измерений при эксплуатации и аудите в энергоснабжении. Несмотря на то что ЦИП используют типовые микроэлектронные схемы – триггеры, ключи, логические элементы и т. п., принципы функционирования приборов различаются. Блок-схема цифрового частотомера показана на рис. 22.

Принцип действия цифрового частотомера заключается в определении числа импульсов, пропорциональных частоте f_x , за известный интервал времени $T_N = 1$ с. Интервал $T_N = 1$ с получается путем деления частоты образцового генератора Γ делителем частоты ДЧ с коэффи-

циентом n , значит $T_N = \frac{n}{f_o}$. Напряжение U измеряемой частоты f_x через формирующее устройство Φ , дающее остроконечные импульсы с частотой f_x , и ключ $K2$ поступают в счётчик $СЧ$. Ключ $K2$ открывается триггером $Тр$, управляемым ключом $K1$ на время T_N .

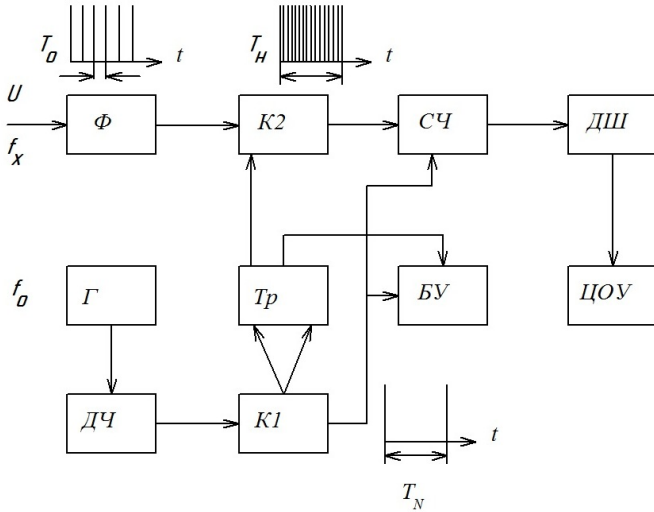


Рис. 22. Блок-схема цифрового частотомера

Поэтому число импульсов, записанное в счётчик: $N = \frac{T_N}{T_x} = \frac{nf_x}{f_o}$
 или $f_o = \frac{Nf_o}{n} = \frac{N}{T_N}$, что при $T_N = 1$ с означает $f_x = N$.

Блок управления (БУ) задаёт такты измерений, управляет работой счётчика. Дешифратор (ДШ) преобразует двоичный код счётчика в десятичный для индикации на цифровом отсчётном устройстве (ЦОУ) с помощью знаковых индикаторов. Точность измерений частоты таким прибором при $T_N = 10$ с равна 0,2%. Определение частоты по принципу измерения периода $T_x = \frac{1}{f_x}$ при $f_o = 1$ МГц и $f_x = 50$ Гц даёт точность 0,005%.

Номенклатура ЦИП позволяет решать задачи точных автоматических измерений различных электрических величин с вводом информации в ЭВМ. Из числа применяемых эксплуатационных ЦИП следует

отметить частотомер Ф 246. Этот частотомер имеет полноразмерный цифровой светящийся индикатор для наблюдения со значительного расстояния. Обычно устанавливается на главных щитах управления энергоблоками электрических станций и крупных подстанций для измерения частоты.

Вопросы для самоконтроля

1. Преимущества цифровых измерительных приборов.
2. Недостатки цифровых измерительных приборов.
3. Принцип действия цифровых измерительных приборов.

10. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Приборы магнитоэлектрической системы измеряют постоянный ток либо его среднее значение, приборы электродинамической, ферродинамической, электромагнитной, электростатической и термоэлектрической систем – действующее значение. Вольтметры и амперметры всех систем в зависимости от входного преобразователя измеряют амплитудное, действующее либо выпрямленное значения [7; 12].

На рис. 23 показано включение амперметра и вольтметра непосредственно и через трансформаторы тока и напряжения в однофазную цепь. На рис. 22 – включение амперметров и вольтметров для измерений токов фаз и напряжений фаз в трёхфазную сеть. Для включения магнитоэлектрических вибраторов при регистрации токов и напряжений в однофазной сети используется схема, представленная на рис. 14 и 15.

Поскольку трансформаторы тока и напряжения имеют номинальные токи и напряжения вторичных обмоток 5(1) А и 100 В, то применяются электромагнитные амперметры и вольтметры на такие же пределы токов и напряжений. На амперметрах часто указывается, с каким трансформатором тока по коэффициенту трансформации он должен использоваться.

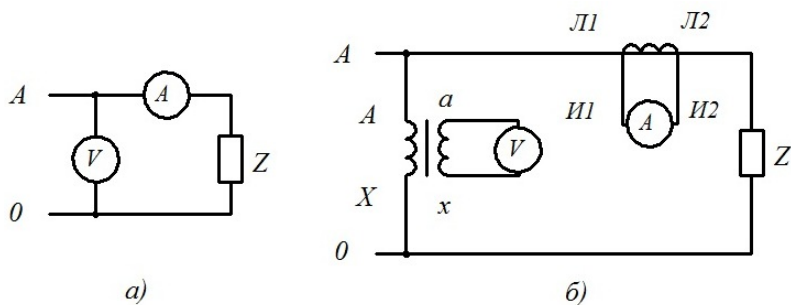


Рис. 23. Схемы включения амперметра (а) и вольтметра (б) в однофазную сеть

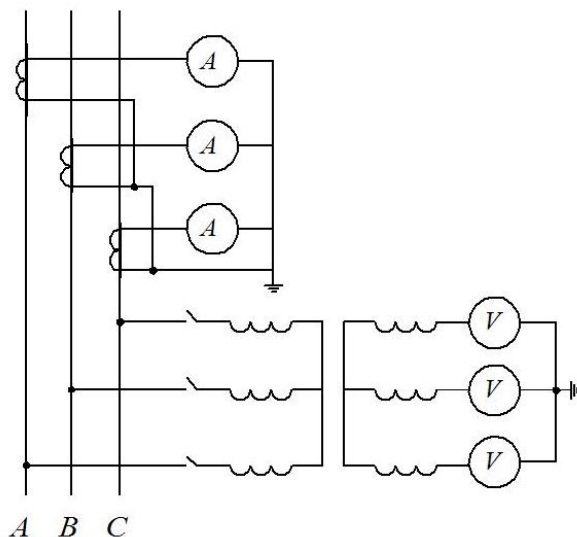


Рис. 24. Включение амперметров и вольтметров в трехфазную цепь через трансформаторы тока и напряжения

Включение амперметров с трансформатором тока позволяет осуществлять замену приборов при замыкании вторичной цепи трансформатора, не нарушая электроснабжения.

Щитовые аналоговые электронные и цифровые приборы для подключения также используют трансформаторы тока и напряжения, хотя могут подключаться и непосредственно в цепях до 1000 В.

Бесконтактное измерение токов осуществляется токоизмерительными клещами, показанными на рис. 25. Они представляют собой разъемный магнитопровод с сечением s и радиусом r_{cp} , охватывающий проводник с током I , причем магнитопровод является трансформатором тока с обмоткой u_1, u_2 и витками w .

Для такой магнитной цепи, состоящей из магнитопровода l_M и воздушного промежутка l_B с напряженностями поля H_M и H_B , можно записать:

$$Iw = H_M l_M + H_B l_B.$$

При $l_B \ll l_M$, считая, что индукция постоянна по длине магнитопровода, имеем: $B_M = B_B = \mu \mu_0 H_M = \mu_0 H_B$, поэтому $H_B = \mu H_M$.

$$I = H_B l_B (1 + l_M / \mu l_B) = H_B l_B',$$

поскольку $\mu > 10^4$.

Следовательно:

$$E = -\mu\mu_0 s w / 2\pi r_{cp} (dI/dt) = CI.$$

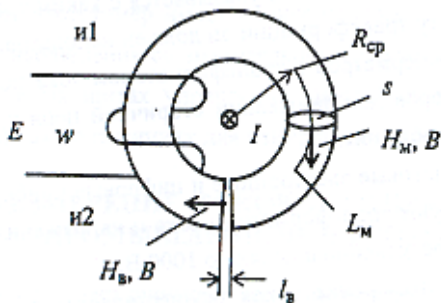


Рис. 25. Токоизмерительные клещи

Ввиду того что ЭДС имеет малую величину, клещи используют в качестве измерительных приборов микроамперметры выпрямительной системы. Схема клещей приведена на рис. 26.

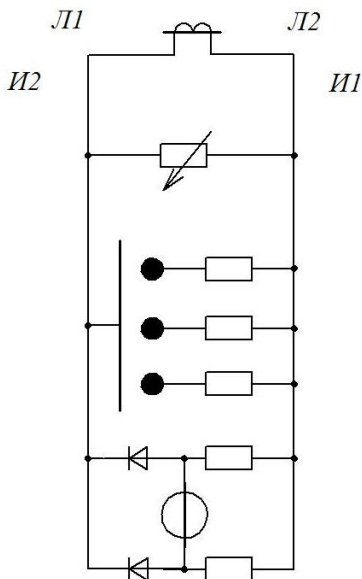


Рис. 26. Схема токоизмерительных клещей

Современные токоизмерительные клещи часто оснащаются цифровыми табло тока и представляют весьма совершенные приборы для бесконтактных измерений токов в однофазных цепях с невысоким классом точности порядка 2,5–4%.

Клещи предназначены для проведения измерений тока как в круглых проводниках, так и в шинных конструкциях.

При аудите токовой нагрузки удобно применять однопредельный цифровой миллиамперметр по схеме, приведенной на рис. 27, с использованием преобразователя Е 824, миллиамперметра Φ 215-1/8 на 5 мА и цифровой печати с помощью устройства Φ 5033 К.

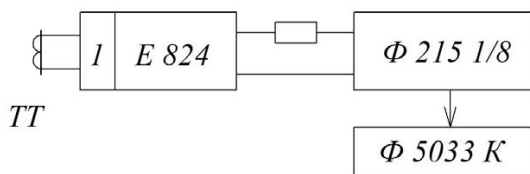


Рис. 27. Использование преобразователя Е 824 с цифровой печатью

Погрешность дискретности регистрации графика $\delta = 0,02\%$, что недостижимо при использовании самопишущих приборов. Прибор Φ 215-1/8 или его более современные аналоги с пределом измерения 5 мА при использовании преобразователей Е 800 позволяют построить различные схемы аудита. График токовой нагрузки получается в виде распечатки.

Вопросы для самоконтроля

1. Как измеряется значение тока в сети при подключении амперметра через трансформатор тока?
2. Как измеряется значение напряжения в сети при подключении вольтметра через трансформатор напряжения?
3. Что позволяет осуществлять подключение амперметров через трансформаторы тока?
4. Как осуществляется бесконтактное измерение тока?

11. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Измеряя сопротивления на постоянном токе, диагностируют состояние переходных сопротивлений, обмоток, изоляции, а также измеряют неэлектрические величины, в которых сопротивление является мерой температуры, перемещения и других величин [7].

Диапазон сопротивлений здесь достаточно широк и колеблется от миллиом до мегаом, поэтому используются различные способы измерений. Простейший косвенный способ измерений с помощью амперметра и вольтметра имеет разные схемы включения приборов. Для малых сопротивлений используется схема, приведенная на рис. 28, относительная погрешность которой

$$R = \frac{U}{(I + I_V)} = \frac{R_X}{(1 + R_X / R_V)}, \text{ или } \delta = \frac{(R - R_X)}{R_X} \cong \frac{R_X}{R_V}.$$

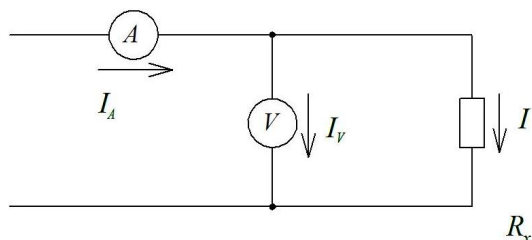


Рис. 28. Схема измерения малых сопротивлений

Для больших сопротивлений используется схема – рис. 29. Здесь относительная погрешность

$$R = (U + U_A) / I_A = R_X + R_A, \quad \delta = \frac{R_A}{R_X}.$$

Схема простейшего омметра показана на рис. 30. Прибор состоит из источника ЭДС, резистора R_d и амперметра (микроамперметра).

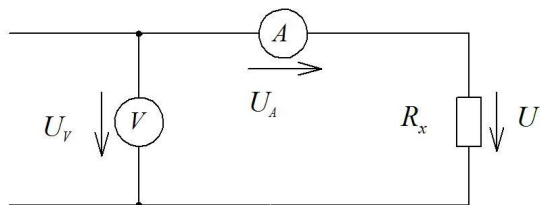


Рис. 29. Схема измерения больших сопротивлений

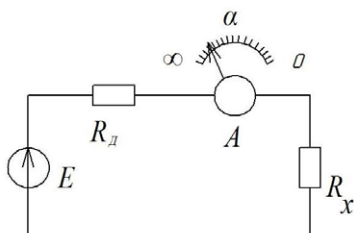


Рис. 30. Схема простейшего омметра

Такие омметры являются широко распространенными измерительными приборами общего применения, позволяющими производить измерения токов, напряжений и сопротивлений в полевых условиях, так как не требуется внешнего источника питания.

При подключении сопротивления амперметр показывает отклонение

$$\alpha = \frac{E}{C_I (R_d + R_A + R_X)}.$$

Следовательно, шкала омметра нелинейна. Поскольку омметр в качестве источника ЭДС использует гальванический элемент, который с течением времени разряжается, поправка вносится изменением C_I или R_d . Электронный омметр, показанный на рис. 31, также используется для измерения сопротивлений. Напряжение на входе:

$$U_{BX} = \frac{ER_X}{R_X + R_O} \cong \frac{ER_X}{R_O}.$$

Напряжение на выходе:

$$U = \frac{KER_X}{R_O} = K_1 R_X.$$

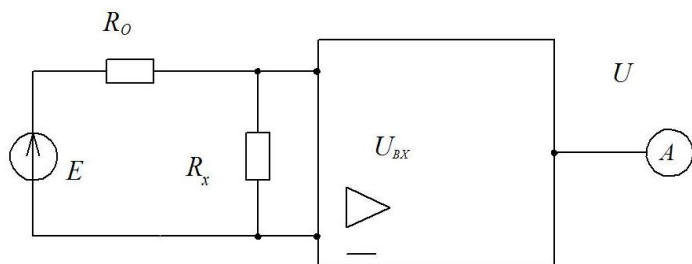


Рис. 31. Схема электронного омметра

Электронный омметр является лабораторным прибором. К его достоинствам относится высокое входное сопротивление и возможность измерений сопротивлений на многих диапазонах.

Наряду со сложными электронными приборами для измерения сопротивлений применяются измерительные мосты, имеющие высокую точность, автономное питание, ручное и автоматическое уравновешивание с цифровой индикацией результата измерений. Номенклатура этих средств измерения сопротивления чрезвычайно велика и приведена в соответствующих справочниках.

Измерительные мосты являются высокоточными средствами измерений сопротивлений в полевых и лабораторных условиях, так как имеют внутренний и внешний источник питания. Мосты постоянного тока предназначены для точных измерений сопротивления в широком диапазоне. Используются разные схемы включения мостов, позволяющие исключать влияние поводов при дистанционных измерениях, измерять сверхмалые сопротивления, проводить автоматические измерения с цифровым отсчетом.

Мост, называемый одинарным по двухзажимной схеме включения, показан на рис. 32.

Условие равновесия такого моста:

$$(R_x + 2R_{II})R_4 = R_2R_3,$$

Погрешность из-за влияния проводов, %, $\delta = \left(\frac{2R_{II}}{R_x} \right) 100$.

Если $2R_{II} = 0,01$ Ом, то при $\delta = 0,1\%$, $R_x = 10$ Ом.

Сопротивление R_x – минимальное сопротивление, которое может быть измерено одинарным мостом при двухзажимной схеме включения с погрешностью 0,1%.

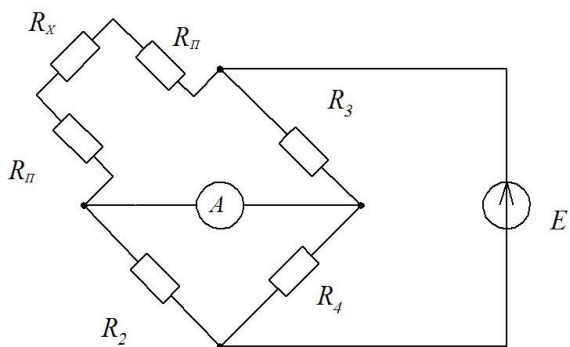


Рис. 32. Одинарный мост по двухзажимной схеме включения

Одинарный мост по четырехзажимной схеме включения (рис. 33) сопротивления R_x может измерять малые сопротивления. Условие равновесия моста по такой схеме включения:

$$R_x R_4 = (R_2 + R_\pi)(R_3 + R_\pi).$$

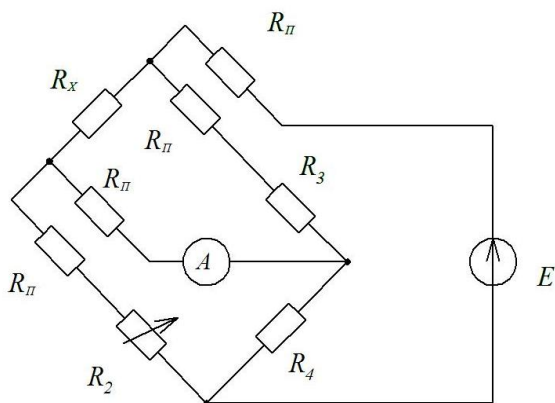


Рис. 33. Одинарный мост по четырехзажимной схеме включения

Погрешность из-за влияния проводов:

$$\delta = R_\pi \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{R_\pi}{R_2 R_3} \right).$$

При условии $R_2 R_3 > R_\pi$ она может быть существенно уменьшена. Двойной мост, показанный на рис. 34, предназначен для измерения сверхмалых сопротивлений.

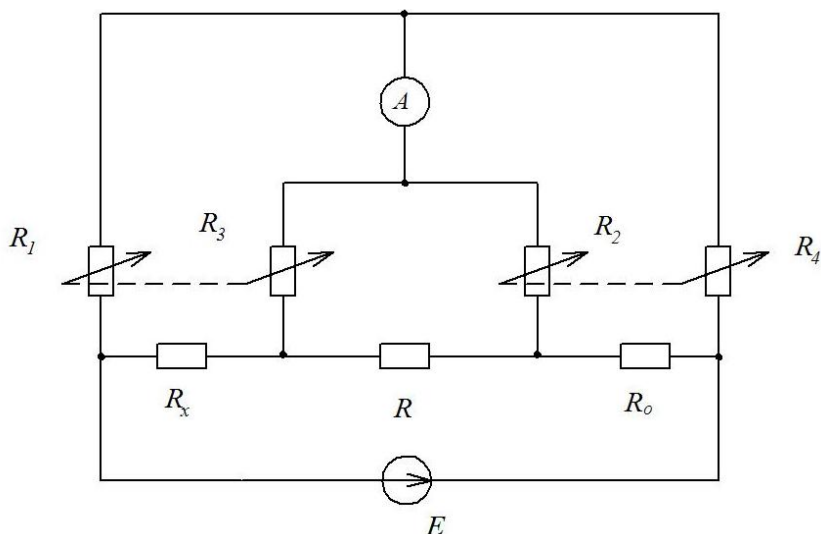


Рис. 34. Схема двойного моста

Условие равновесия двойного моста:

$$R_x = R_o(R_1/R_2) + R/(R + R_3 + R_4)\{(R_1R_4)/R_2\} - R_3\}.$$

Выбирая $R_2 = R_4$, $R_1 = R_3$, получаем $R_x = R_o(R_1/R_2)$.

Поскольку резисторы R_1 , R_3 и R_2 , R_4 имеют спаренное управление, их равенство соблюдается при изменении как R_1 , так и R_2 . Мосты широко применяются как точные измерители сопротивления, расстояния до места повреждения кабеля, асимметрии проводов.

Автоматические мосты с цифровым отсчетом (рис. 35) позволяют представлять результат измерения на цифровом отсчетном устройстве (ЦОУ) и полностью исключить ручные операции уравнивания.

Плечи моста 2, 3 содержат соответствующие резисторы, соотношение которых определяет диапазон измерения, выбираемый автоматически по сигналу рассогласования устройства СУ. Баланс моста осуществляется плечом 4, где имеются проводимости $G_1 \dots G_n$, соотношения между которыми соответствуют определенным числам, поэтому, комбинируя положения их ключей, можно задать любое значение проводимости $\sum_{j=1}^n G_j$. Введя коэффициент α_j , характеризующий состояние ключа в плече 4 ($\alpha_j = 0$ – разомкнут, $\alpha_j = 1$ – замкнут), можно суммировать проводимость:

$$G_4 = \sum_{j=1}^n \alpha_j G_j.$$

Условие равновесия моста: $G_4 = \frac{R_x}{R_2 R_3}$.

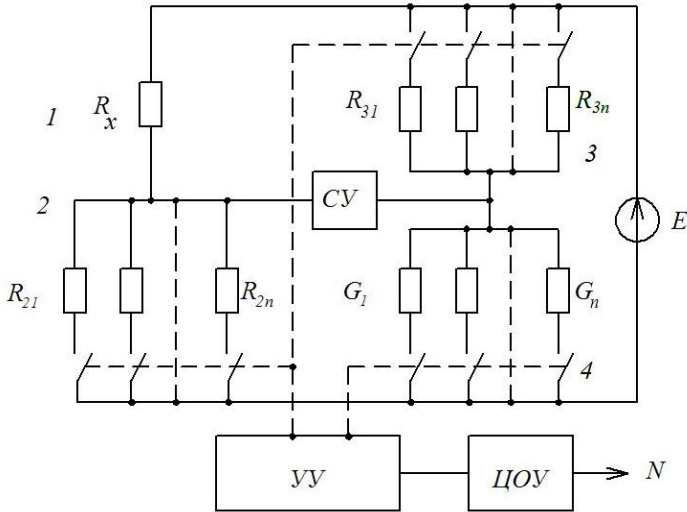


Рис. 35. Схема цифрового моста

Поскольку G_4 однозначно определяется комбинацией ключей в плече 4, то по значениям коэффициентов α_j в устройстве управления (УУ) формируется десятичный код N , отражающий результат измерения.

Таким образом, средства измерений сопротивления на постоянном токе обеспечивают как лабораторные, так и технические измерения.

Измерение сопротивления независимо от метода проводят при установленном тепловом режиме, когда температура объекта отличается от температуры среды на 3°C .

Вопросы для самоконтроля

1. Как измеряются малые сопротивления на постоянном токе?
2. Как измеряются большие сопротивления на постоянном токе?
3. Почему шкала омметра нелинейная?
4. Достоинства электронных омметров.
5. Схема моста для измерения сопротивления на постоянном токе.

12. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Измерением полного сопротивления и его составляющих диагностируют состояние обмоток и изоляции электрооборудования переменного тока. Диапазон измеряемых сопротивлений от Ом до килоом. При простейшем косвенном методе используются амперметр, вольтметр и ваттметр для измерения малых и больших сопротивлений так же, как и на постоянном токе, однако имеются различные схемы.

Для малых сопротивлений используется схема, изображенная на рис. 36,а, для больших – на рис. 36,б.

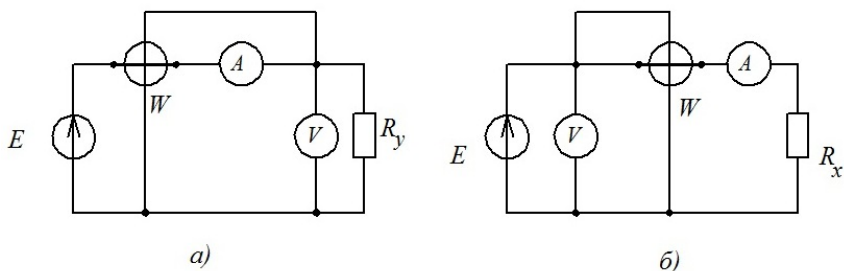


Рис. 36. Измерение сопротивлений методом амперметра-вольтметра-ваттметра: а – для малых сопротивлений; б – для больших сопротивлений

Если $R_x = P/I^2$ и $Z_x = U/I$, то

$$X_x = \sqrt{(U/I)^2 - (P/I^2)^2}.$$

Точность измерений определяется классом точности приборов.

Составляющие реактивного сопротивления измеряются мостами переменного тока. Их измерение позволяет диагностировать состояние изоляции и параметров реальных емкостей и индуктивностей элементов электрооборудования. Реальные конденсаторы и индуктивности имеют различные схемы замещения и характеризуются тангенсом угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ и добротностью Q .

Для измерения $\operatorname{tg} \delta$, характеризующего совершенство конденсатора, используется мост, позволяющий отсчитывать $\operatorname{tg} \delta$ на шкале, произ-

водить измерения на высоком напряжении и обеспечивать при этом безопасное обслуживание. На рис. 37 приведена схема моста для случая, когда объект находится под напряжением. Возможна обратная схема включения.

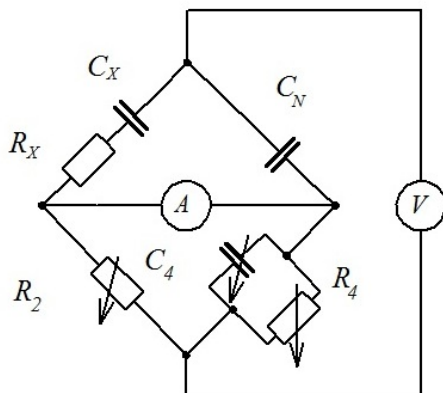


Рис. 37. Схема моста для измерения $tg \delta$

Из теории мостовых схем переменного тока известно, что условие равновесия

$$Z_X Z_4 = Z_2 Z_N$$

или

$$\left(R_X + \frac{1}{j\omega C_X}\right) \left(\frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}\right) = \frac{R_2}{j\omega C_N}$$

После преобразований получим

$$R_X R_4 = \frac{jR_4}{\omega C_N}$$

Равновесие возможно при $Re = Im$:

$$R_X = \frac{R_2 C_4}{C_N}, \quad C_X = \frac{R_4 C_N}{R_2},$$

поэтому

$$tg \delta = \omega C_4 R_4$$

Для прямого отсчета $tg \delta$ определяем по шкале

$$R_4 = 10000/\pi = 3184 \text{ Ом},$$

поэтому $tg \delta = C_4$.

Вопросы для самоконтроля

1. Как измеряются малые сопротивления на переменном токе?
2. Как измеряются большие сопротивления на переменном токе?
3. Как измеряется реактивное сопротивление?
4. Как измерить $\operatorname{tg} \delta$ емкости с потерями?
5. Схема моста для измерения $\operatorname{tg} \delta$.

13. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Мощность в цепях постоянного и переменного токов измеряется электродинамическими и ферродинамическими ваттметрами, описанными ранее [2; 7].

Приборы электродинамической системы для лабораторных измерений имеют класс точности 0,1; 0,2; 0,5.

Для промышленных измерений используются ферродинамические приборы класса 1; 1,5; 2, имеющие равномерную шкалу.

Электродинамические ваттметры измеряют мощность в расширенной полосе частот, ферродинамические – на частоте 50 Гц. Электродинамические ваттметры поверяются и градуируются на постоянном токе по схеме – рис. 38.

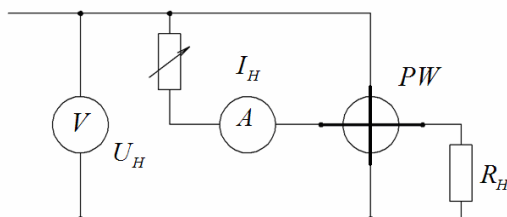


Рис. 38. Схема поверки ваттметра

Постоянная ваттметра определяется как

$$C_H = \frac{U_H I_H}{\alpha_K},$$

где U_H , I_H – номинальные напряжение и ток; α_K – число делений шкалы.

Лабораторные ваттметры одноэлементные, технические – двух- и трехэлементные, т. е. имеют две и три пары обмоток, электромагнитные моменты суммируются в механизме.

Существуют три способа измерения мощности:

1) одного прибора – применим для однофазных и трехфазных сетей.

Используется один одноэлементный ваттметр;

- 2) двух приборов – применим для трехфазных симметричных и несимметричных сетей и использует один двухэлементный ваттметр или два одноэлементных;
- 3) трех приборов – применим для трехфазных симметричных и несимметричных сетей. Использует три одноэлементных или один трехэлементный ваттметр. Для расширения пределов применяют трансформаторы тока и напряжения.

Измерение мощности одним ваттметром показано на рис. 39, *a–в*.

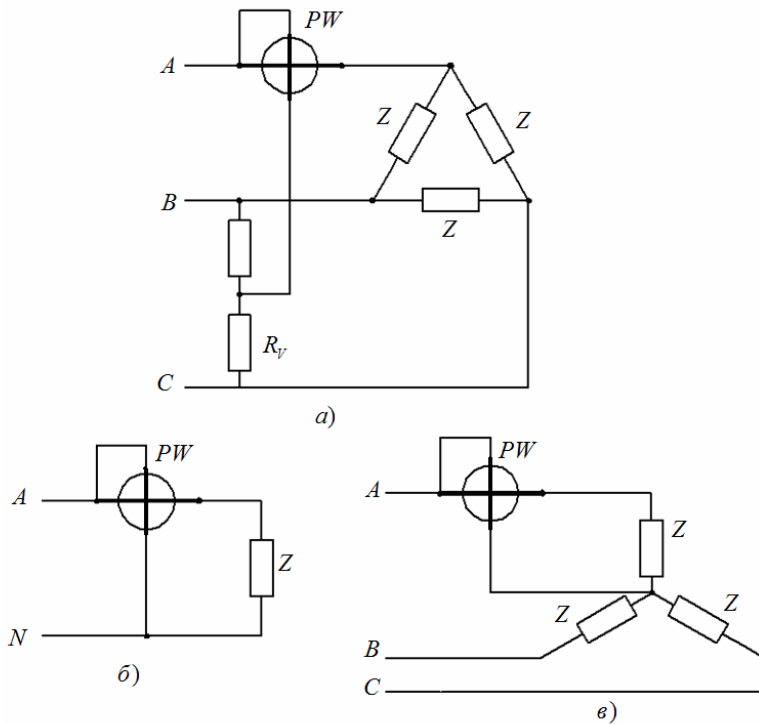


Рис. 39. Измерение мощности одним ваттметром: *a* – нагрузка включена в «треугольник»; *б* – однофазная сеть; *в* – нагрузка включена в «звезду»

Для схемы на рис. 39, *a* нагрузка включена в треугольник:

$$P_w = 3 U_\phi 3I_\phi \cos \varphi = 9U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3\sqrt{3}U_L I_\phi \cos \varphi .$$

В этой схеме, где недоступна средняя точка, образуется искусственная точка 0 резисторами R_v , где R_v – сопротивление обмотки напряжения ваттметра.

Для схемы на рис. 39,б, в которой ваттметр измеряет мощность в однофазной сети:

$$P_w = U_\phi I_\phi \cos \phi.$$

Для схемы на рис. 39,в, где ваттметр измеряет мощность в трёхфазной сети с нагрузкой, включённой в «звезду»:

$$P_w = 3U_\phi I_\phi \cos \phi = 3\sqrt{3}U_{Л} I_\phi \cos \phi.$$

В однофазной высоковольтной сети ваттметр включают через трансформаторы тока и напряжения, как показано на рис. 40.

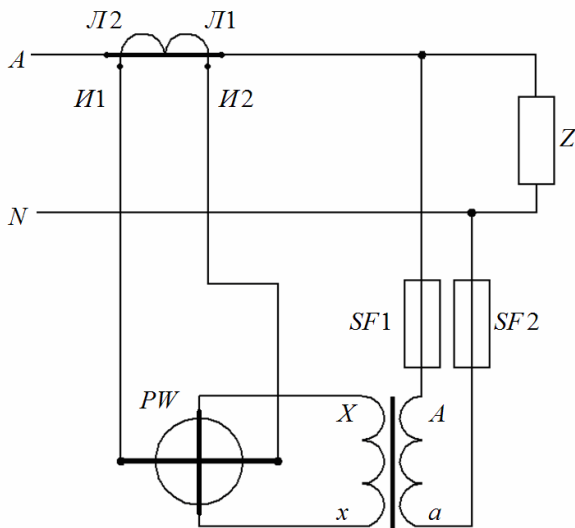


Рис. 40. Схема измерения мощности в высоковольтной цепи

Здесь мощность, измеряемая ваттметром, находится по формуле

$$P = P_w K_U K_I.$$

Такая же схема подключения используется для ваттметра в трёхфазной сети.

Измерение мощности методом двух приборов или двухэлементным ваттметром показано на рис. 41,а.

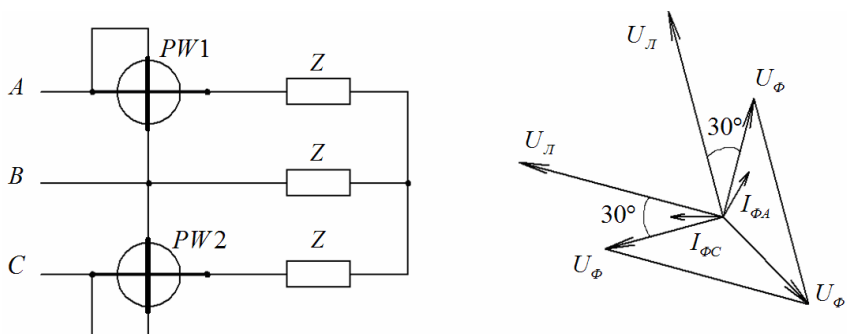


Рис. 41. Измерение мощности двумя ваттметрами или двухэлементным ваттметром (а) и векторная диаграмма (б)

Векторная диаграмма представлена на рис. 41,б для $Z_A = Z_B = Z_C$. В этом случае:

$$P_{w1} = U_L I_\phi \cos(30^\circ + \varphi);$$

$$P_{w2} = U_L I_\phi \cos(30^\circ - \varphi);$$

$$P = P_{w1} + P_{w2} = 2U_L I_\phi \cos 30^\circ \cos \varphi = \sqrt{3}U_L I_\phi \cos \varphi.$$

Здесь возможны измерения суммарной мощности при симметрии и несимметрии фаз.

Измерение мощности методом трех приборов или трехэлементным ваттметром показано на рис. 42 и применяется в трехфазной четырехпроводной сети.

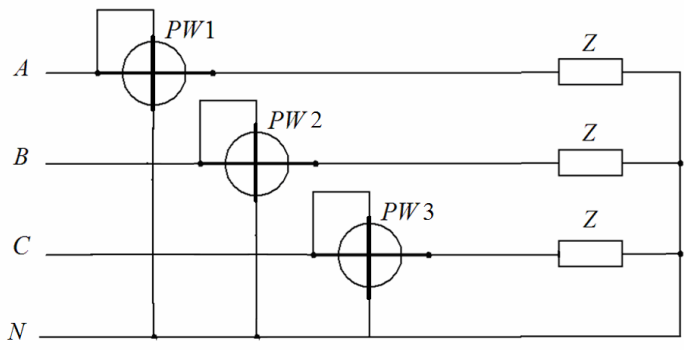


Рис. 42. Измерение активной мощности методом трех приборов в трехфазной четырехпроводной цепи

Очевидно, что

$$P = P_{w1} + P_{w2} + P_{w3} = U_{\phi 1} I_{\phi 1} \cos \varphi_1 + U_{\phi 2} I_{\phi 2} \cos \varphi_2 + U_{\phi 3} I_{\phi 3} \cos \varphi_3.$$

Определив $S = S_1 + S_2 + S_3 = U_{\phi 1} I_{\phi 1} + U_{\phi 2} I_{\phi 2} + U_{\phi 3} I_{\phi 3}$, можно рассчитать коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = P/S.$$

Имея одинаковое обозначение в виде функции угла между напряжением и током, коэффициент мощности вводится для трехфазной сети как отношение активной и полной мощностей.

Измерение реактивной мощности с помощью одного прибора (ваттметра) возможно в однофазных и трехфазных трехпроводных и трехфазных четырехпроводных сетях по схемам с заменённым (сдвинутым по фазе) напряжением. Эта схема дает правильные показания в случае симметрии напряжений и нагрузок. Схема включения для трехфазной сети показана на рис. 43,а, векторная диаграмма – на рис. 43,б. Здесь

$$P_W = U_{BC} I_A \cos (90^\circ - \varphi) = \sqrt{3} U_\phi I_\phi \sin \varphi$$

$$Q_W = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} P_W$$

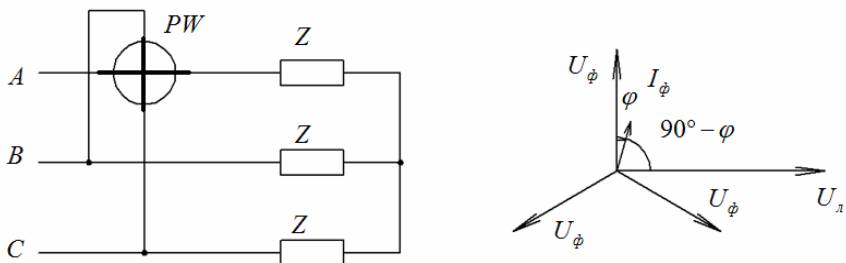


Рис. 43. Измерение реактивной мощности в симметричной трехфазной сети одним ваттметром (а) и векторная диаграмма (б)

Измерение реактивной мощности в трехфазной четырехпроводной сети показано на рис. 44,а, векторная диаграмма – на рис. 44,б.

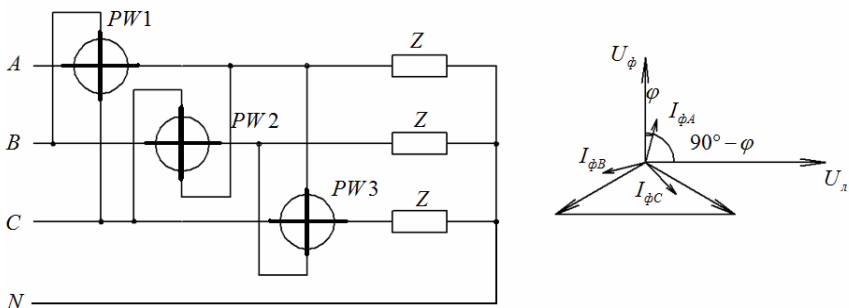


Рис. 44. Измерение реактивной мощности тремя ваттметрами в трехфазной сети (а) и векторная диаграмма (б)

Вопросы для самоконтроля

1. Какие способы измерения мощности вам известны?
2. Измерение мощности методом трех приборов.
3. Где возможно измерение мощности одним ваттметром?
4. Как измерить реактивную мощность одним ваттметром?
5. Как измерить реактивную мощность тремя ваттметрами?

14. СЧЕТЧИКИ И СИСТЕМЫ УЧЁТА ЭНЕРГИИ

Учет активной и реактивной энергии производится индукционными приборами с вращающимся диском и интегрирующим механизмом, а также электронными и микропроцессорными счетчиками [2; 8]. Самыми распространёнными являются индукционные счетчики, выпускаемые в трёх исполнениях: одноэлементные (однофазные), двухэлементные (трехфазные) и трехэлементные (трёхфазные четырехпроводные). Магнитные системы одно- и трёхфазных счётчиков имеют одинаковое конструктивное исполнение, отличающееся от изложенного при описании конструкции индукционных механизмов.

Взаимодействие потоков приведено на рис. 45. Индукционный счетчик появился в результате открытия Феррарисом явления вращения металлического немагнитного диска в результате взаимодействия двух переменных магнитных полей, сдвинутых по фазе. В настоящее время, несмотря на появление более современных электронных и микропроцессорных приборов учета, он является штатным средством учета электроэнергии. Используется одна магнитная система, где взаимодействие потока Φ_U обмотки напряжения происходит с потоком Φ_I , дважды пронизывающим диск, который имеет ось вращения O . С вращающимся диском соединён интегрирующий механизм (счетчик), не показанный на рис. 45 [9].

Индукционные токи I_U от Φ_U и I_I от Φ_I взаимодействуют с потоками, создавая вращающий момент $M_{ep} = cf\Phi_U\Phi_I$, где Ψ – угол сдвига между Φ_U и Φ_I .

На линейной части кривой $B(H)$ имеем:

$$\Phi_I = K_1 I, \quad \Phi_U = K_2 I_U = \frac{K_2 U}{2\pi f L} = \frac{K_3 U}{f},$$

поэтому $M = KUI \sin \Psi$.

Счётчик будет учитывать активную энергию, если

$$M = KUI \cos \Psi,$$

где Ψ – угол между Φ_U и Φ_I .

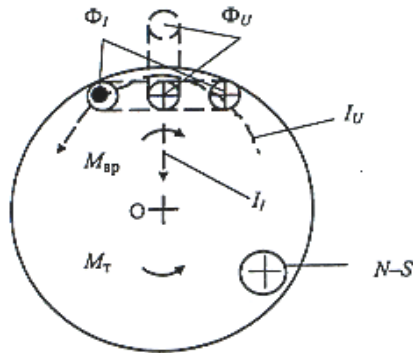


Рис. 45. Магнитная система счетчика

Так как $\sin \Psi = \cos \varphi$, если $\Psi + \varphi = 90^\circ$, то в реальной обмотке напряжения β – угол между $(\Phi_U$ и $U) > 90^\circ$, где $\beta = \Psi + \varphi + \alpha_I$, причем α_I – угол сдвига между Φ_I и I . Регулируя в токовой обмотке сопротивление, добиваются: $90^\circ = \beta - \alpha_I$.

В этом случае $M_{вр} = KUI \cos \varphi$.

При вращении диска с угловой скоростью $\omega = d\alpha / dt$ возникает основной тормозной момент от постоянного магнита $M_T = K_4 d\alpha / dt$ и дополнительные тормозные моменты от токов резания, пропорциональные квадратам токов в обмотках U, I .

Пренебрегая дополнительными моментами, можно записать:

$$M_{вр} = KUI \cos \varphi = K_4 d\alpha / dt.$$

Далее, интегрируя, имеем

$$K \int_0^t P dt = K_4 \int_0^{2nN} da$$

или $E = Ph = CN$, где C – постоянная, кВт-ч/об.

Передаточное число, указываемое на счетчике, 1 кВт-ч = N_0 оборотов диска.

Другими словами, номинальная постоянная счетчика:

$$C_H = 36 \cdot 10^5 / N_0 \text{ (Втс/об)};$$

$$Ph = C_H N; P = C_H n.$$

Здесь n – частота вращения, об/с, N – число оборотов диска.

Таким образом, счётчики как штатные приборы могут служить средством учёта потребляемой энергии и измерения мощности. Подробнее теория индукционного счетчика изложена в специальной литературе.

Считая, что замедление вращения диска приводит к отрицательной погрешности, а ускорение – к положительной, и, учитывая момент трения, компенсационный момент и момент торможения, можно проанализировать влияние их на погрешность индукционного механизма.

Типичная кривая погрешности счетчика приведена на рис. 46.

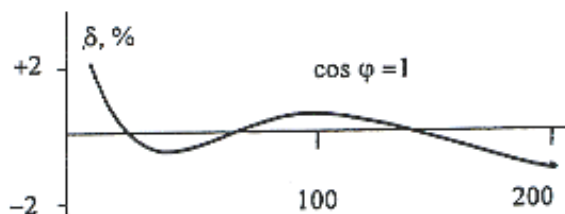


Рис. 46. Зависимость погрешности индукционного счетчика от нагрузки

Механизмы счетчиков имеют классы точности 0,5; 1; 2; 2,5, определяемые по результатам испытаний в диапазоне токовых нагрузок при $\cos \varphi = 1$ и 0,5.

Диапазон допустимых нагрузок составляет 150–400% от I/I_N для разных счетчиков. Подобный тангенциальный механизм используется во всех счетчиках.

Обозначения счетчиков [10; 11]

СО – одноэлементный однофазный – для учета активной энергии в однофазных цепях.

СА 3 – двухэлементный трехфазный – для учета активной энергии в трехфазных трехпроводных цепях.

СА 4 – трехэлементный трехфазный – для учета активной энергии в трехфазных четырехпроводных цепях.

СР 4 – трехэлементный трехфазный – для учета реактивной энергии в трехфазных четырехпроводных цепях.

Универсальные счетчики, обозначаемые дополнительно буквой «У», могут включаться с различными трансформаторами тока и напряжения.

Счетчики, дополнительно обозначаемые буквой «Д», имеют телеметрический датчик импульсов.

Все счетчики для правильного включения имеют специальную маркировку зажимов обмоток напряжения и тока: «Г» – генератор, «Н» – нагрузка.

На рис. 47 показано прямое включение одноэлементного счетчика СО, а на рис. 48 – включение двухэлементного трехфазного счетчика СА 3 через трансформаторы тока и напряжения, на рис. 49 – прямое включение трехэлементного счетчика реактивной энергии СР 3.

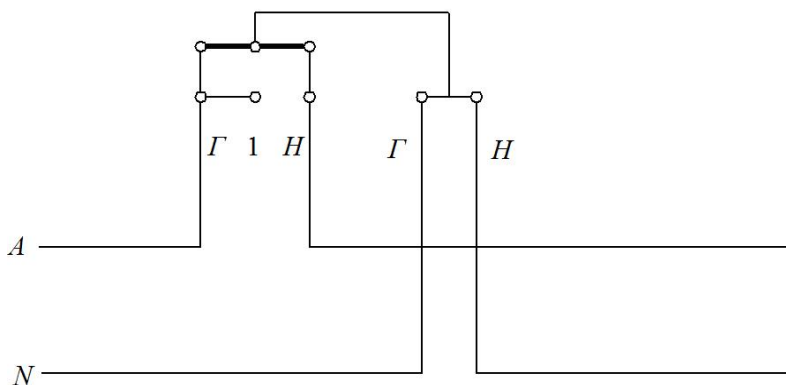


Рис. 47. Подключение однофазного счетчика СО

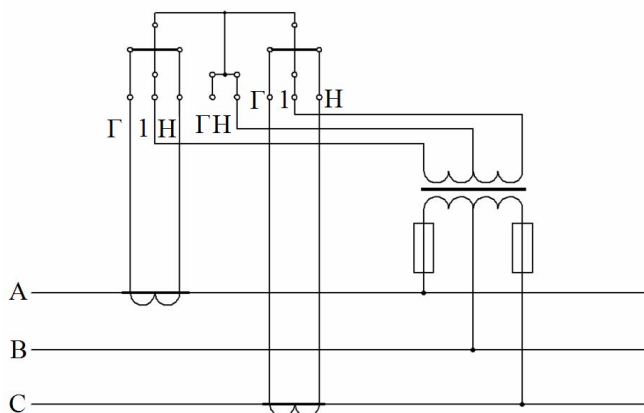


Рис. 48. Схема включения двухэлементного трехфазного счетчика СА3

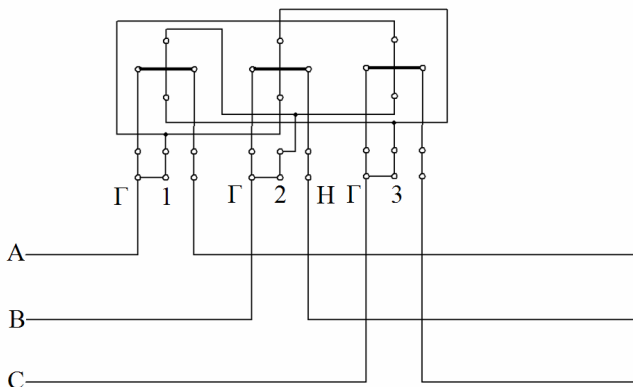


Рис. 49. Прямое включение трехэлементного счетчика реактивной энергии СРЗ

Измеряя активную и реактивную мощности в трехфазной сети по частотам вращения дисков счётчиков активной и реактивной энергии W_a , W_p , можно измерить коэффициент мощности $\text{tg } \varphi$. Для этого необходимо рассчитать постоянные счётчиков, учитывая, если необходимо, коэффициенты трансформации трансформаторов тока и напряжения, и за интервал времени t_H определить число оборотов дисков счетчиков активной и реактивной энергии $N_{c.a}$, $N_{c.p}$:

$$W_a = C_{\text{ном}} N_{c.a} / t_{H1};$$

$$W_p = C_{\text{ном}} N_{c.p} / t_{H2};$$

$$\text{tg } \varphi = W_A / W_P .$$

Учет энергии с помощью индукционных счетчиков возможен с сохранением класса точности только на синусоидальном токе при спокойном характере нагрузки. При наличии высших гармоник и нестационарных процессов эти счетчики дают значительную погрешность.

В последнее время появились электронные счетчики, позволяющие учитывать энергию при несинусоидальном токе методом широтно-импульсной модуляции, когда токи и напряжения преобразуются в длительность и амплитуду импульсов с последующим перемножением.

При этом получают дискретные значения мгновенных мощностей $p = U_y I_x$. Последующее интегрирование и преобразование среднего значения в частоту, измеряемую счетчиком, позволяет учитывать энергию.

Схема однофазного счетчика СА 3У-Ф-650 на операционных усилителях приведена на рис. 50. Принцип широтно-импульсной модуляции изображен на рис. 51. Усилители У1, У2 работают как мультивибраторы. На выходе У2 напряжение $\pm E_0$ с частотой, определяемой мультивибратором.

Амплитуда задается стабилитронами VD1, VD2. При положительных I_x и I_0 напряжение U_j находится как

$$U_1 = \frac{-1}{R_1 C_1 (I_x + I_0)} + \frac{E_0}{R_2} = \frac{E_0}{R_2},$$

так как У2 работает как триггер Шмитта при $I_1 + I_2 = 0$. Вследствие этого:

$$T_{II} = \frac{2R_1 C_1 E_0}{R_2 (I_0 + I_x)} \text{ и } T_{II} = \frac{2R_1 C_1 E_0}{R_2 (I_0 - I_x)},$$

поэтому $T_{II} = T_{II}$.

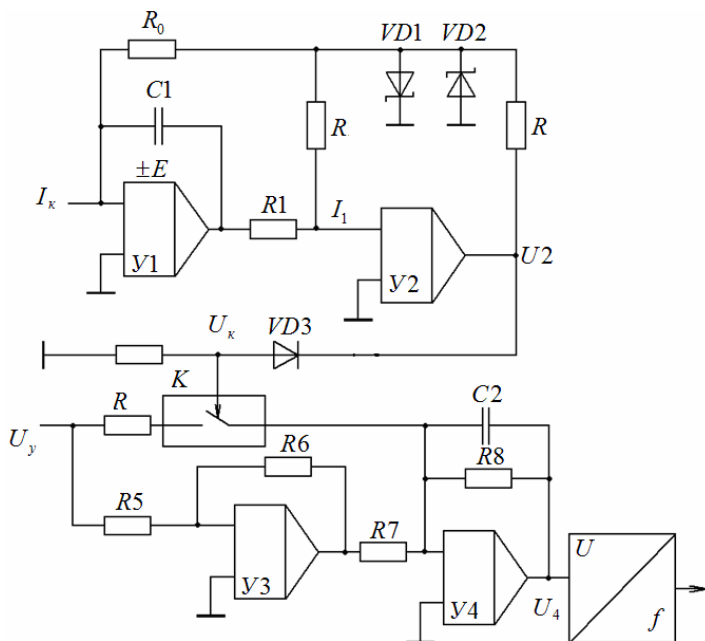


Рис. 50. Электронный счетчик СА 3У – Ф-650

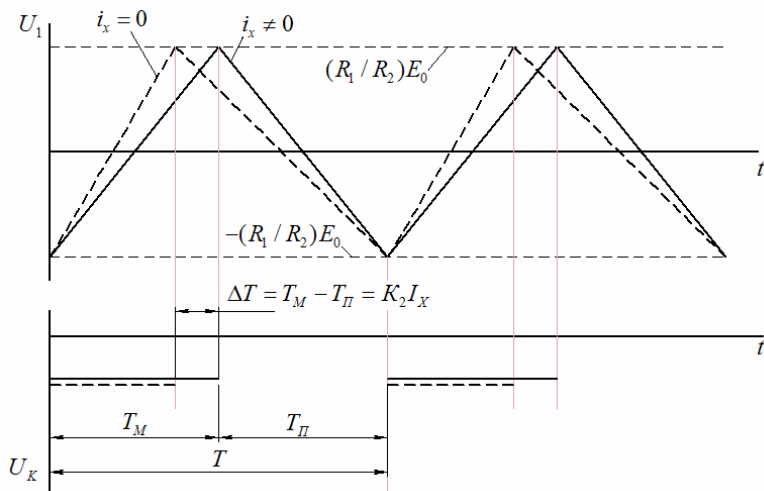


Рис. 51. Принцип широтно-импульсной модуляции

На выходе получаются импульсы длительностью T_{II} , которые управляют ключом K . При $T_{II} \neq T_M$ на вход генератора $У5$ поступают знакопеременные токи, пропорциональные U_y :

$$I_y = K_1 U_y.$$

Средний ток за время импульса T будет пропорционален мгновенной мощности:

$$I_{y\text{cp}} = \frac{K_1 K_2 U_y I_x}{T} = \frac{K_1 U_y (T_{II} - T_M)}{I_O} = \frac{K_1 U_y I_x}{I_O} = K_P.$$

Счетчик включается через трансформаторы тока и напряжения. Трехфазный счетчик образуется двумя однофазными. Усовершенствование принципа широтно-импульсной модуляции позволило создать на этом принципе преобразователь активной мощности Е 848 класса 0,2.

Счетчики, основанные на этом принципе, позволили создать недорогие и точные электронные приборы учета энергии для бытовых и мелкомоторных потребителей достаточно высокого класса точности.

Эти счетчики позволяют легко осуществить двухтарифный учет электроэнергии, что сложно реализуется в индукционных счетчиках.

В настоящее время стоимость электронного счетчика ненамного превосходит стоимость индукционного.

В последнее время появились различные микропроцессорные счетчики АББ ВЭИ «Метроника» и другие, основанные на интегральных схемах специального назначения, предназначенные для промышленного учета электроэнергии для энергоемких потребителей.

Важным положительным свойством микропроцессорных счетчиков являются их информационные возможности в части измерений показателей качества энергии и построения на их основе АСКУЭ.

Первичный ток в счетчиках измеряется с помощью измерительных трансформаторов тока, имеющих малую линейную и угловую погрешность в широком диапазоне измерений. В цепи трансформаторов тока установлены шунтирующие резисторы, сигналы с которых поступают на вход измерительной микросхемы (Digital Signal Processor DSP). Измеряемое напряжение каждой фазы через высоколинейные резистивные делители подаются непосредственно на измерительную микросхему (рис. 52).

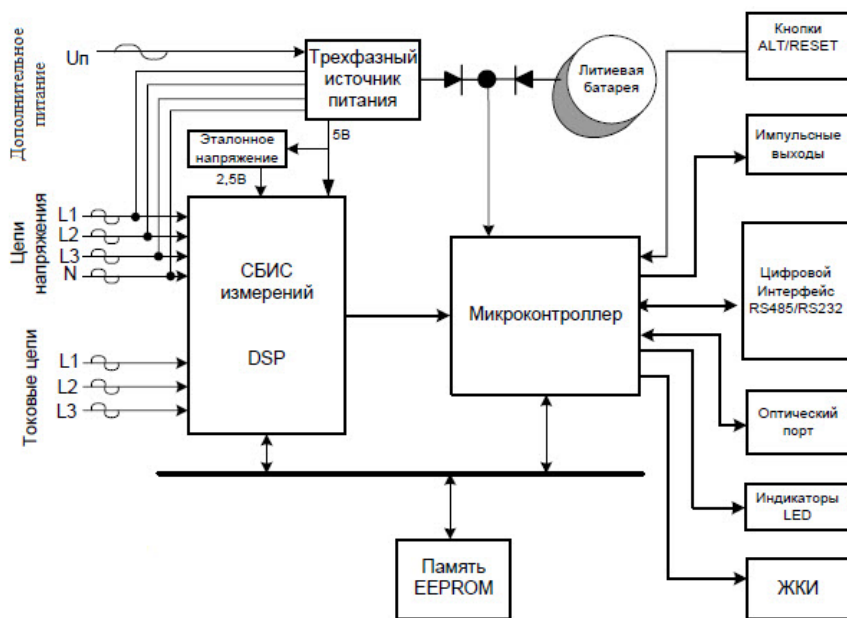


Рис. 52. Блок-схема микропроцессорного счетчика «Альфа А1800»

Измерительная микросхема (DSP) осуществляет выборки входных сигналов токов и напряжений по каждой фазе, используя встроенные

аналого-цифровые преобразователи, и выполняет различные вычисления для получения всех необходимых величин. С выходов DSP на микроконтроллер поступают интегрированные по времени сигналы активной и реактивной энергии.

Микроконтроллер осуществляет дальнейшую обработку полученной от DSP информации и накопление данных в энергонезависимой памяти (EEPROM); также микроконтроллер управление отображением информации на ЖКИ, выводом данных по энергии на выходные импульсные устройства и обменом по цифровому интерфейсу.

Счетчик реализует следующие возможности: учет потребленной активной, реактивной и полной энергии, контроль выданной энергии и управление, для чего имеется блок электронных реле (ЭР). Кварцевые генераторы обеспечивают временную привязку данных измерений и команд управления. Внешние устройства представляют собой оптический порт, токовую петлю и устройство RS-485. Счетчик имеет высокую стоимость, требует сервисного обслуживания и доступен только специально подготовленному персоналу для квалифицированной эксплуатации. Миниатюрное выполнение этой микро-ЭВМ с табло на жидких кристаллах позволило оформить его в корпусе обычного однофазного счетчика типа СО – 5У. Класс точности счетчика – 0,2.

Стоимость счетчика «Альфа А1800» в настоящее время практически равна стоимости персонального компьютера. Аналогичное устройство можно реализовать путем специального программирования компьютера и создания устройств связи с сетью через трансформаторы тока и напряжения.

Если счетчик «Альфа А1800» является автономным средством коммерческого учета с получением графиков энергопотребления за различные временные периоды, то измерительная интегральная автоматизированная система управления энергосбережением (ИА-СУЭ) ЗАО «ЭНЭЛЭКО», разработанная для промышленного и бытового учета энергии разных видов, имеет иерархическую структуру, позволяющую вести коммерческий учет электроэнергии, тепловой энергии, воды, газа, а также передавать сигналы пожарной, охранной сигнализации и оповещения. Она обеспечивает передачу данных на радиочастоте между 4095 пунктами. Дальность связи – до 60 км по радиоканалу при использовании штыревых антенн. На нижнем уровне

для передачи сигналов от 127 абонентов применяются двухпроводные линии длиной до 1,2 км.

Для учета электроэнергии используются электронные двухтарифные однофазные счетчики СЭБ-2, СЭБ-512 и трехфазные ПСЧ-3Т с автономным блоком переключения тарифов БПТ-250. Счетчики имеют класс точности 1, напряжение 220 В, диапазон токов 50 мА – 50 А и напряжение 380 В.

На рис. 53 приведена структура АСУЭ для жилого дома. В узле клиента (УК) квартиры собирается информация от расходомера холодной воды (РХВ), горячей воды (РГВ), противопожарной сигнализации (ППС), охранной сигнализации (ОС), двухтарифного счетчика электроэнергии (ДЭС) и звонка (ЗВ). В узле дома (УД) собирается информация от счетчика электроэнергии (ЭС), расходомера воды (РВ), датчика температуры (ДТ) системы отопления.

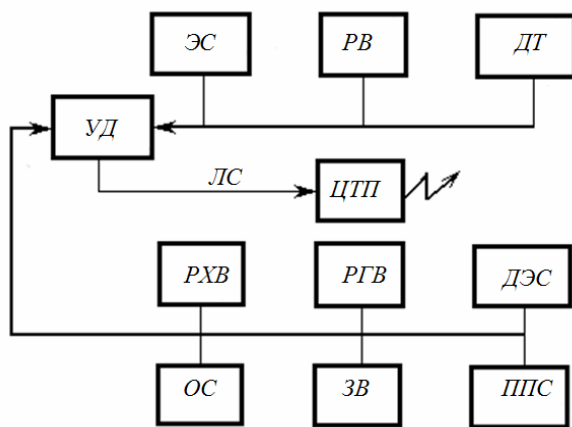


Рис. 53. Блок-схема ИАСУЭ ЗАО «ЭНЭЛЭКО» жилого дома

По двухпроводной линии связи (ЛС) информация передается на центральный тепловой пункт (ЦТП), и далее по радиоканалу на диспетчерский пункт, осуществляющий сбор и обработку информации. Эта система легко адаптируется для промышленного предприятия. В качестве первичных измерительных преобразователей датчиков, счетчиков и расходомеров используются автономные электромеханические устройства с формирователем сигналов. Съем показаний счет-

чиков и расходомеров осуществляется путем подсчета импульсов с выходных контактов устройств. Эта система позволяет использовать как отечественные электронные, так и микропроцессорные счетчики.

Система была разработана для Московского региона и отличается низкой стоимостью.

Следует заметить, что в последнее время появились и индукционные счетчики с магнитной подвеской диска. Значительное уменьшение трения привело к уменьшению погрешности при снижении стоимости и увеличению межповерочного срока службы и времени эксплуатации счетчика. Эти однофазные индукционные счетчики Е 100 и трехфазные Е 1100 представляют собой простые, дешевые и надежные счетчики класса 1,0 для бытового потребителя. К сожалению, пока они лишены телеметрического выхода. На рис. 54 приведена зависимость погрешности такого счетчика от токовой нагрузки.

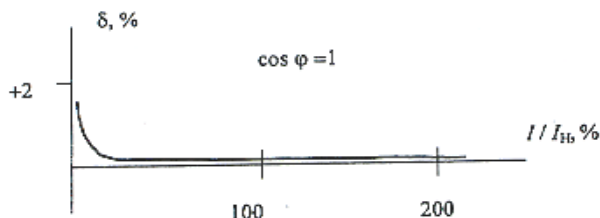


Рис. 54. Зависимость погрешности счетчика Е 100 от нагрузки

Вопросы для самоконтроля

1. Какие разновидности индукционных счетчиков имеются?
2. Что такое передаточное число счетчика?
3. Как выглядит кривая погрешности индукционного счетчика?
4. Обозначения счетчиков.
5. Схемы включения счетчиков.
6. Каковы возможности и области применения электронных и микропроцессорных счетчиков?
7. Принцип широтно-импульсной модуляции.
8. Алгоритм функционирования микропроцессорных счетчиков.
9. Как выглядит кривая погрешности индукционного счетчика с магнитной подвеской диска?

15. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭНЕРГИИ

Достоверная оценка показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в сети и разработка эффективных мероприятий, направленных на обеспечение качества электроэнергии, невозможны без инструментального контроля. Для проведения такого контроля необходимы специализированные средства измерения (СИ). Интенсивное развитие микропроцессорной техники позволило создать отечественным разработчикам многофункциональные СИ, предназначенные для контроля и анализа качества электроэнергии [8].

Задачи контроля качества электроэнергии определяют конкретные требования к СИ ПКЭ. Единое условие при выборе СИ заключается в том, что все средства должны соответствовать требованиям ГОСТ 13109-97 [3] в части, касающейся алгоритмов измерений ПКЭ и допускаемых погрешностей измерения. Перечень измеряемых ПКЭ установлен ГОСТ 13109-97, но может быть расширен в зависимости от решаемых задач.

Показателями КЭ являются:

δU_y – установившееся отклонение напряжения;

δU_t – размах изменения напряжения;

P_t – доза фликера;

K_U – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;

$K_{U(n)}$ – коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения;

K_{2U} – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;

K_{OU} – коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;

Δf – отклонение частоты;

Δt_n – длительность провала напряжения;

$U_{имп}$ – импульсное напряжение;

$K_{перU}$ – коэффициент временного перенапряжения.

Существенной функциональной особенностью СИ, определяющей конструктивные и климатические требования к ним, элементную базу, систему электропитания, возможности хранения и передачи результатов измерений, является вид измерений – непрерывный или периодический.

Существующие нормативы рекомендуют проводить периодический контроль качества электроэнергии с различными интервалами между очередными контрольными измерениями. Так, согласно ГОСТ 13109-97 длительность непрерывных измерений ГЖЭ для контроля выполнения требований этого стандарта определяется 24 часами как обязательная и семью сутками как рекомендуемая. Периодичность контроля качества электроэнергии, устанавливаемая этим стандартом, составляет в зависимости от вида ПКЭ от двух раз в год до одного раза в два года.

Общие требования, предъявляемые к современным СИ ПКЭ

Конструктивное исполнение приборов должно соответствовать аналогичным требованиям, предъявляемым к счетчикам электроэнергии. В первую очередь это касается требований:

- 1) обеспечения электробезопасности (исполнение корпуса и наличие зажима защитного заземления);
- 2) защиты от несанкционированного доступа (возможность пломбирования органов управления и использования системы паролей).

Климатические воздействующие факторы. Средства измерений должны быть рассчитаны на нормальное функционирование при температурах от -30 до 40°С и относительной влажности до 90%.

Электропитание приборов должно обеспечивать возможность подключения к сети переменного напряжения 220 В и ко вторичным цепям измерительных трансформаторов напряжением 57,7 и 100 В, допускается функционирование СИ при провалах в диапазоне $\pm 40\%$ номинального напряжения сети. Кроме питания от внешней сети переменного напряжения некоторые производители СИ ПКЭ предлагают возможность питания от независимого источника постоянного напряжения. При проектировании систем автономного питания переносных СИ необходимо учитывать продолжительность их работы (7 суток и более).

Важной характеристикой блока электропитания является максимальная потребляемая мощность, которая для современных СИ ПКЭ не должна превышать 20 ВА.

Электромагнитная совместимость приборов должна удовлетворять требованиям устойчивости к воздействию внешних помех.

Входные каналы СИ должны обеспечивать проведение измерений в трех фазах контролируемой сети с заземленной или изолированной нейтралью. Номинальные напряжения входных измерительных каналов составляют 57,7; 100 и 220 В.

Требования к входным каналам по току определяются способом присоединения СИ к измерительным трансформаторам тока. Оснащение переносных приборов токоизмерительными клещами существенно упрощает их присоединение к контролируемой сети. Средства контроля качества электроэнергии, используемые стационарно, для повышения точности измерений целесообразно подключать путем врезки во вторичные цепи трансформаторов тока без применения токовых клещей, имея в виду, что у большинства трансформаторов тока вторичный номинальный ток равен 5 А.

Принцип действия СИ должен в реальном масштабе времени обеспечивать непрерывное измерение ПКЭ и вспомогательных параметров электроэнергии по установленным ГОСТ 13109-97 алгоритмам. Все современные СИ ПКЭ являются цифровыми программируемыми приборами, использующими высокоразрядные аналого-цифровые преобразователи и быстродействующие процессоры. Программное обеспечение является основной частью СИ ПКЭ. При неизменной конструкции прибора его функциональные возможности могут быть существенно расширены за счет совершенствования программного обеспечения.

Средства измерений, предназначенные как для непрерывного, так и для периодического контроля качества электроэнергии, должны обладать достаточной по объему энергонезависимой памятью, позволяющей длительно сохранять результаты измерений. Архивы с результатами контроля ПКЭ, накапливаемые в памяти СИ, должны содержать информацию о времени проведения измерений. Данные архивы не могут быть скорректированы и являются наиболее достоверными источниками информации о выполненных измерениях. В настоящее время существует несколько подходов к обеспечению длительного хранения результатов измерений.

Во-первых, СИ ПКЭ может иметь встроенную оперативную память, достигающую в современных приборах десятков мегабайт. Во-вторых,

информация может сохраняться на съемных картах памяти, объем которых достигает десятков гигабайт. И, в-третьих, если СИ реализован на базе переносного компьютера, памятью прибора является жесткий диск этого компьютера. Кроме того, практически все современные СИ поставляются совместно с программным обеспечением, позволяющим через стандартные интерфейсы сохранять архивы измерений прибора на отдельном компьютере. Подобное программное обеспечение существенно упрощает обработку и анализ результатов измерений, а также позволяет накапливать многолетнюю статистику о закономерностях изменения ПКЭ.

Средства измерения должны обеспечивать **возможность отображения** как результатов измерений текущих параметров режима, так и архивной информации. Большинство из существующих СИ ПКЭ имеют для этого алфавитно-цифровой дисплей, а небольшое количество приборов дополнительно оснащено графическим дисплеем, который упрощает проведение измерений и оперативный анализ результатов.

Выносимая на дисплеи информация должна без дополнительной обработки результатов измерений отражать все характеристики качества электроэнергии, определяющие условия выполнения или невыполнения предъявляемых требований на заданном интервале времени, в течение которого эти характеристики получены, а также экстремальные значения измеряемых параметров на этом интервале.

На рис. 55 приведена структура типового средства измерения качества электрической энергии. Измеряемые напряжения и токи подаются на входные зажимы блока масштабных преобразователей (делителей), в котором путем аналоговой обработки формируются сигналы, пропорциональные параметрам входного напряжения, т. е. происходят масштабные преобразования до уровня (приблизительно 1 В), необходимого для нормальной работы блока аналого-цифрового преобразования.

Мгновенные значения сигналов на выходах БМП преобразуются в цифровые коды с помощью БАЦП, в котором осуществляются согласование по времени входных сигналов и их оцифровка. Оцифровка производится из расчета 256 выборок 14-разрядного кода на период основной частоты. Коды оцифрованных сигналов поступают в блок обработки информации.

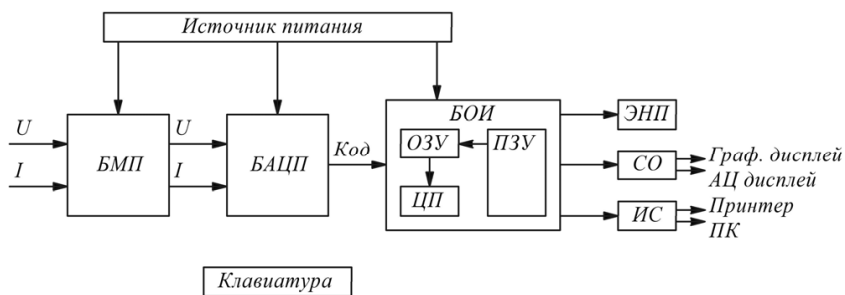


Рис. 55. Структура средств измерений: БМП – блок масштабных преобразований; БАЦП – блок аналого-цифрового преобразователя; БОИ – блок обработки информации; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; ЦП – центральный процессор; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; ЭНП – энергонезависимая память; СО – средство отображения; ИС – интерфейс связи; АЦ – алфавитно-цифровой дисплей

В БОИ центральный процессор производит обработку полученной от АЦП информации в соответствии с программами постоянного запоминающего устройства.

Результаты измерений заносятся в энергонезависимую память для хранения (если прибор работает в режиме «измерений»), а также выводятся на средства отображения. В большинстве приборов СО представляет собой алфавитно-цифровой дисплей. В некоторых приборах имеется также графический дисплей, который позволяет отображать векторные диаграммы, спектры, гистограммы и осциллограммы токов и напряжений.

С помощью интерфейса связи типа RS-232 (RS-485) осуществляется вывод результатов измерений по каналам связи на внешнюю промышленную электронно-вычислительную машину или принтер.

Клавиатура прибора используется для управления прибором при его настройке и просмотре результатов измерений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие показатели качества электроэнергии вы знаете?
2. Какова обязательная и рекомендуемая длительность непрерывных измерений ПКЭ для контроля выполнения требований стандарта ГОСТ 13109-97?
3. Какие требования предъявляются к современным СИ ПКЭ?

16. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ, ЧЕРЕДОВАНИЯ ФАЗ И ЧАСТОТЫ

Измерение угла сдвига фаз и частоты осуществляется с помощью электродинамических и ферродинамических приборов – логометров, использующих специальные схемы включения. Так осуществляется прямое измерение этих параметров и их регистрация.

Схема электродинамического показывающего фазометра показана на рис. 56,а. Векторная диаграмма приведена на рис. 56,б.

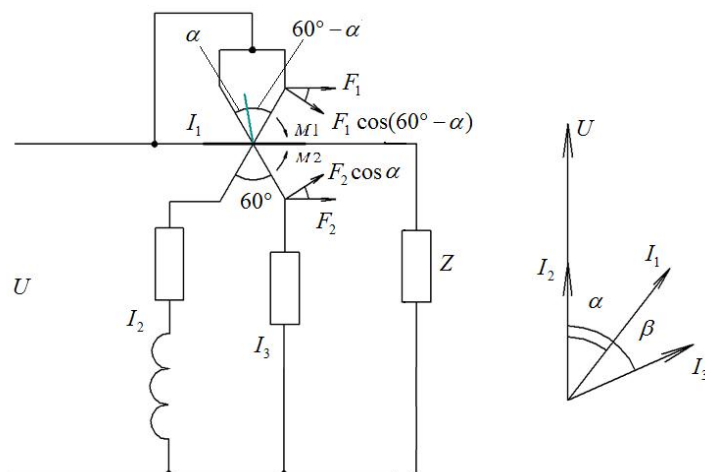


Рис. 56. Схема электродинамического фазометра (а)
и векторная диаграмма (б)

Логометр имеет две рамки – обмотки напряжения, жестко соединенные под углом 60° , и безмоментные токоподводы. Третья рамка – токовая обмотка – неподвижна.

При отклонении рамок на угол a при равенстве моментов M_1 и M_2 :
 $M_1 = C_1 I_1 I_2 \cos \varphi \cos (60^\circ - a)$; $M_2 = C_2 I_1 I_3 \cos (\beta - \varphi) \cos \alpha$.

При $C_1 I_1 I_2 = C_2 I_1 I_3$ и $\beta = 60^\circ$

$$\frac{\cos \varphi}{\cos a} = \frac{\cos (60^\circ - \varphi)}{\cos (60^\circ - a)}, \text{ то есть } \varphi = \alpha.$$

Шкала такого фазометра равномерна и градуируется в единицах φ или $\cos \varphi$.

Схема включения электродинамического фазометра для измерений угла сдвига фаз в симметричной трехфазной сети приведена на рис. 57.

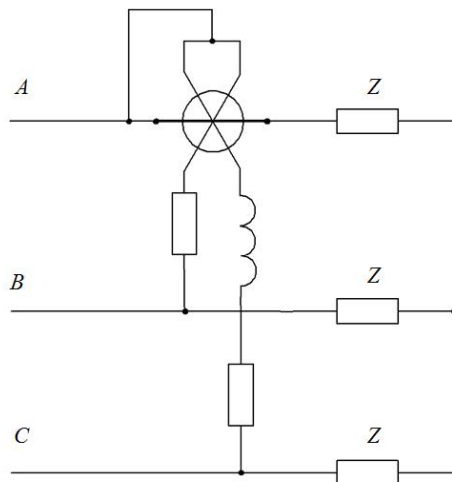


Рис. 57. Включение электродинамического фазометра в трехфазную сеть

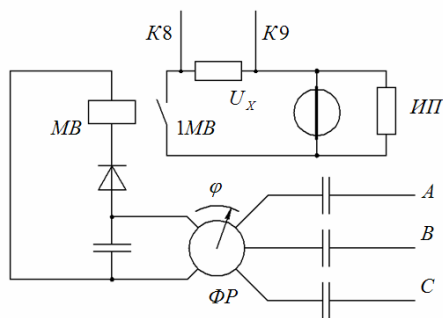


Рис. 58. Измерение фазы прибором ВАФ-85М

В универсальном приборе ампервольтфазометре ВАФ-85 М измерение фазы производят с помощью управляемого механического выпрямителя. Схема прибора в положении «измерение фазы» показана на рис. 58. Механический выпрямитель, (МВ), представляющий собой

быстродействующий контакт (1 МВ), включен последовательно с магнитоэлектрическим прибором (И).

Напряжение, управляющее работой механического выпрямителя, подается с фазорегулятора (ФР), подключенного к известным фазам А, В, С. От положения ротора фазорегулятора зависит фаза замыкания контакта 1 МВ относительно фазы измеряемого напряжения U_x .

Если $\varphi = \pi/2$, где φ – угол между U_x , U_y , то ток прибора $I_{ИП} = 0$. Прибор градуируется так, что при подаче U_{AB} на клеммы 8, 10 устанавливается нуль ИП – нуль отсчета. Значение фазы U_x определяется относительно U_{AB} по нулю ИП при вращении лимба фазорегулятора ФР.

Прибор ВАФ-85М позволяет измерять переменный ток до 250 мА и напряжение до 220 В, а также имеет приставку для измерений токов до 10 А бесконтактным способом.

Лабораторные фазометры, имеющие широкий диапазон рабочих частот, обычно являются электронными приборами и предназначены для измерений фазы в однофазных цепях с синусоидальным либо несинусоидальным напряжением.

Поскольку в процессе наладки электрооборудования, содержащего электродвигатели и устройства релейной защиты, важное значение имеет чередование фаз, существуют простые приборы – фазоуказатели, с помощью которых можно определить чередование фаз.

Электродвигатель рассчитан на U от 50 до 500 В и кратковременное включение кнопкой К длительностью до 3 с для определения направления вращения. Прибор имеет маркированные клеммы подключения и указатель направления вращения. Схема прибора показана на рис. 59.

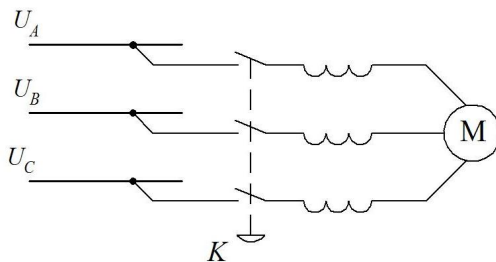


Рис. 59. Схема указателя чередования фаз с электродвигателем

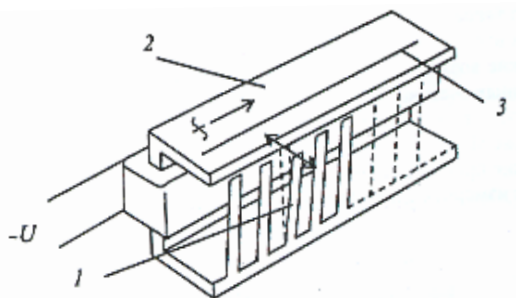


Рис. 60. Электромагнитный частотомер

Измерение частоты в промышленных сетях проводится для контроля режима энергосистемы и осуществляется электромеханическими приборами в узком диапазоне частот.

Такие частотомеры имеют электромагнитные, электродинамические либо ферродинамические механизмы.

Простейший дискретный электромагнитный частотомер вибрационного типа В 80 показан на рис. 60. Он представляет ряд электромеханических резонансных фильтров-язычков 1 с резонансными частотами от 48 до 52 Гц через 0,5 Гц, возбуждаемых электромагнитом 2. Изображение резонирующего конца язычка размывается и наблюдается по шкале 3. Частотомер может питаться от напряжения $U = 100, 127$ и 220 В на номинальной частоте 50 Гц. Класс точности 1. Частотомер охватывает диапазон от 48 до 52 Гц.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие приборы используются для измерения угла сдвига фаз?
2. Для чего определяется порядок чередования фаз?
3. Как называются приборы, определяющие порядок чередования фаз?
4. Сфере применения частотомеров.
5. Принцип действия простейшего дискретного электромагнитного частотомера вибрационного типа.

Библиографический список

1. Димов, Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник для вузов / Ю.В. Димов. – 3-е изд. – СПб. : Питер, 2010. – 463 с.
2. Раннев, Г.Г. Интеллектуальные средства измерений : учебник для вузов / Г.Г. Раннев. – М. : Академия, 2011. – 262, [1] с.
3. Информационно-измерительная техника и электроника : учебник для вузов / Г.Г. Раннев [и др.] ; под ред. Г.Г. Раннева. – 2-е изд., стереотип. – М. : Академия, 2007. – 511 с.
4. Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений : учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 3-е изд., стереотип. – М. : Академия, 2006. – 331 с.
5. Садовский, Г.А. Теоретические основы информационно-измерительной техники: задачи и упражнения : учеб. пособие для вузов / Г.А. Садовский. – М. : Высш. шк., 2009. – 212 [3] с.
6. Сергеев, А.Г. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник для вузов / А.Г. Сергеев, В.В. Терегеря. – М. : Юрайт, 2010. – 820 с.
7. Информационно-измерительная техника и электроника. Электрические измерения в системах электроснабжения : практикум по выполнению лаб. работ для студ. направления 140200 «Электроэнергетика» спец. 140211 «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения / сост. В.П. Тараканов. – Тольятти : ТГУ, 2009. – 46 с.
8. Алиев, И.И. Электротехнический справочник / И.И. Алиев. – 4-е изд., испр. – М. : РадиоСофт, 2007. – 383 с.
9. Алиев, И.И. Электротехнический справочник / И.И. Алиев. – 4-е изд., испр. – М. : РадиоСофт, 2006. – 383 с.
10. ГОСТ 22261-94 (2004) Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. – Введ. 2004–04–01. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 44 с.










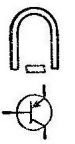
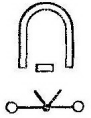
Производные единицы электрических и магнитных величин



Величина	Единица	Обозначение		Выражение производной единицы через другие единицы
		российское	международное	
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	Дж	J	Дж·м
Мощность	ватт	Вт	W	Дж/с
Количество электричества	кулон	Кл	C	А·с
Электрическое напряжение, разность потенциалов, ЭДС	вольт	В	V	Вт/А
Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м	V/m	–
Электрическое сопротивление	ом	Ом	Ω	В/А
Электрическая емкость	фарад	Ф	F	Кл/В
Поток магнитной индукции	вебер	Вб	Wb	В·с
Индуктивность и взаимная индуктивность	генри	Гн	H	Вб/А
Магнитная индукция	тесла	Тл	T	Вб/м ²
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м	A/m	–
Магнитодвижущая сила, сила тока	ампер	А	A	–
Частота	герц	Гц	Hz	с ⁻¹

Приставки к единицам

Приставка	Отношение к основной единице	Обозначение		Приставка	Отношение к основной единице	Обозначение	
		российское	международное			российское	международное
Пико	10 ⁻¹²	п	<i>p</i>	Дека	10	да	<i>da</i>
Нано	10 ⁻⁹	н	<i>n</i>	Гекто	10 ²	г	<i>h</i>
Микро	10 ⁻⁶	мк	<i>μ</i>	Кило	10 ³	к	<i>k</i>
Милли	10 ⁻³	м	<i>m</i>	Мега	10 ⁶	М	<i>M</i>
Санتي	10 ⁻²	с	<i>c</i>	Гига	10 ⁹	Г	<i>G</i>
Деци	10 ⁻¹	д	<i>d</i>	Тера	10 ¹²	Т	<i>T</i>

Условные обозначения приборов

Наименование	Условное обозначение
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Логометр магнитоэлектрический	
Прибор электромагнитный	
Прибор электродинамический	
Прибор ферродинамический	
Логометр ферродинамический	
Прибор индукционный	
Прибор электростатический	
Прибор магнитоэлектрический с выпрямителем (выпрямительный прибор)	
Прибор магнитоэлектрический с электронным преобразователем в измерительной цепи (электронный прибор)	
Прибор магнитоэлектрический с неизолрированным термопреобразователем (термоэлектрический прибор)	
Ток постоянный	-

Наименование	Условное обозначение
Ток переменный	~
Ток постоянный и переменный	⋈
Ток трехфазный переменный (общее обозначение)	⋈⋈⋈
Прибор применять при вертикальном положении шкалы	
Прибор применять при горизонтальном положении шкалы	
Класс точности прибора, например 1,5	1,5 1,5 1,5
Напряжение испытательное, например, 2 кВ	
Магнитная индукция, выраженная в миллitesлах (например, 2 мТл), вызывающая изменение показаний, соответствующее обозначению класса точности	
Щит стальной, толщиной, например, 3 мм	Fe3
Щит нестальной, любой толщины	NFe
Щит любой толщины	FeNFe

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И АУДИТЕ.....	4
2. ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ	6
3. ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ	9
4. АНАЛОГОВЫЕ ПРИБОРЫ.....	11
4.1. Магнитоэлектрические приборы	11
4.2. Электромагнитные приборы	14
4.3. Электродинамические и ферродинамические приборы	16
4.4. Индукционные приборы	19
4.5. Электростатические приборы	20
4.6. Выпрямительные приборы	22
4.7. Термоэлектрические приборы	23
5. МАСШТАБИРУЮЩИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....	25
6. РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ	30
7. КОНТАКТНЫЕ ПРИБОРЫ	34
8. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	36
9. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ	41
10. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ	44
11. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ	48
12. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ	54
13. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ.....	57
14. СЧЕТЧИКИ И СИСТЕМЫ УЧЁТА ЭНЕРГИИ.....	63
15. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭНЕРГИИ.....	74
16. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ, ЧЕРЕДОВАНИЯ ФАЗ И ЧАСТОТЫ.....	79
Библиографический список.....	83
Приложения.....	84

Учебное издание

Тараканов Вячеслав Павлович
Макеев Михаил Сергеевич

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ЭЛЕКТРОНИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учебно-методическое пособие

Редактор *Е.Ю. Жданова*
Технический редактор *З.М. Малявина*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 30.01.2013. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 5,1.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-09-12.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

