

Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Г. П. Минин

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

Г О С Э Н Е Р Г О И З Д А Т

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 62

Г. П. МИНИН

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1962 ЛЕНИНГРАД

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

ЭЭ-3-3

В брошюре рассмотрены вопросы измерения активной и реактивной мощности в электроустановках промышленной частоты. Приведены принципиальные схемы и векторные диаграммы с краткими теоретическими обоснованиями.

Подробно описаны практические схемы измерения мощности в обычных условиях эксплуатации, а также подчеркнуты особенности измерений при испытаниях генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и электродвигателей. Даны сведения по измерению мощности бытовых электроприборов.

Типичные случаи измерений иллюстрируются примерами по выбору приборов, схем и оценке результатов измерения.

Брошюра предназначена для электромонтеров, имеющих законченное среднее образование, знакомых с принципом действия и устройством электроизмерительных приборов и принимающих участие в испытаниях электрооборудования. Она может быть полезна среднему техническому персоналу и учащимся.

6П2. 11 *Мишин Глеб Петрович*
М 62 **Измерение мощности.** М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
96 с. с черт. (Б-ка электромонтера. Вып. 62).

6П2.11

Редактор *Каминский Е. А.*

Техн. редактор *М. М. Широкова*

Сдано в набор 17/X 1961 г.

Подписано к печати 29/XII 1961 г.

Бумага 84×108^{1/32}

4,92 п. л.

Уч.-изд. л. 5,5.

T-12178

Тираж 25 000 экз.

Цена 19 коп.

Заказ 610

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

В технике электрических измерений измерение мощности занимает особое место. Это объясняется, во-первых, его большим практическим значением, во-вторых, сравнительной сложностью, в-третьих, тем, что неправильное включение приборов в ряде случаев не приводит к явно ложным результатам и потому может оказаться незамеченным.

Эта брошюра имеет целью систематически рассмотреть основные вопросы, с которыми приходится сталкиваться при измерениях мощности, и представляет собой изложение следующих разделов.

1. Общая методика измерений, основные определения и формулы (§ 1). В силу того что в последующих параграфах приходится ссылаться на формулы, они перенумерованы.

2. Техника измерений активной мощности: генераторов (§ 2), асинхронных электродвигателей (§ 3), потребителей в сетях трехфазного тока (§ 4), при испытаниях электрооборудования (§ 5 и 6), бытовых электроприборов (§ 11).

3. Техника измерений реактивной мощности (§ 7).

4. Техника измерений при поверках ваттметров (§ 8), а также связанные с нею вопросы по определению мощности, потребляемой электроизмерительными приборами (§ 9) и обмотками реле (§ 10).

5. Осциллографирование мощности (§ 12).

В брошюре приводятся много примеров, иллюстрирующих технику выбора той или иной схемы, приборов, необходимых для измерений, а также оценки полученных результатов. В приложении даны технические характеристики переносных ваттметров.

Ограниченный объем брошюры не дает возможности осветить все многообразие вопросов, связанных с изменением мощности. Перечень рекомендуемой литературы приведен в конце брошюры.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При выработке и распределении электрической энергии почти исключительно применяется трехфазная система переменного тока промышленной частоты (50 гц). Поэтому измерение мощности чаще всего производится в цепях переменного тока.

Основные соотношения. Активная мощность P трехфазного тока равна сумме мощностей каждой фазы, т. е.

$$P = I_1 U_1 \cos \varphi_1 + I_2 U_2 \cos \varphi_2 + I_3 U_3 \cos \varphi_3, \quad (1)$$

где U_1, U_2, U_3 — фазные напряжения;

I_1, I_2, I_3 — фазные токи;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ — углы сдвига фаз между U_1 и I_1, U_2 и I_2, U_3 и I_3 соответственно.

Для симметричной трехфазной системы (фазные напряжения по величине равны, а углы между ними 120°) при равномерной нагрузке фаз выражение мощности трехфазного тока принимает вид

$$P = 3I_\phi U_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} I U \cos \varphi, \quad (2)$$

где I_ϕ — фазный ток;

I — линейный ток;

U_ϕ — фазное напряжение;

U — линейное напряжение;

φ — угол сдвига между фазным напряжением и соответствующим током.

Это выражение справедливо независимо от схемы соединения приемника электроэнергии или генератора. Действительно, при соединении в звезду $U = \sqrt{3} U_\phi$, но $I = I_\phi$; при соединении в треугольник $I = \sqrt{3} I_\phi$, но $U = U_\phi$.

Аналогичное выражение имеет реактивная мощность Q

$$Q = \sqrt{3} I U \sin \varphi. \quad (3)$$

Полная (кажущаяся) мощность S равна

$$S = \sqrt{3}IU. \quad (4)$$

Активная мощность измеряется в ваттах (*вт*), реактивная — в вольт-амперах реактивных (*вар*), полная — в вольт-амперах (*ва*). Величины, в 1000 раз большие, соответственно называются *квт*, *квар*, *ква*.

Выражения активной, реактивной и полной мощностей связаны следующим образом:

$$P = S \cos \varphi, \text{ откуда } \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + S^2}}. \quad (5)$$

$$Q = S \sin \varphi, \text{ откуда } \sin \varphi = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\sqrt{P^2 + S^2}}. \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}. \quad (7)$$

Ваттметры. Измерение активной мощности производится ваттметрами. Переносные ваттметры обычно выполняются однофазными, щитовые — трехфазными.

Однофазный переносный лабораторный или технический ваттметр электродинамической системы имеет неподвижные катушки и подвижную катушку (рамку). По неподвижным катушкам проходит измеряемый (или пропорциональный ему) ток; рамка, соединенная последовательно с добавочным сопротивлением, присоединяется параллельно нагрузке, т. е. измеряет напряжение на ней.

Вращающий момент, создаваемый взаимодействием электродинамических сил, возникающих между неподвижными и подвижной катушкой, равен

$$M_{\text{вр}} = KI_U \cos \varphi = KIU \cos \varphi,$$

где K — постоянный коэффициент, зависящий от свойств данного прибора и его градуировки;

I — ток в последовательной цепи ваттметра;

I_U — ток в параллельной цепи ваттметра;

U — напряжение на нагрузке;

φ — угол сдвига фаз между током нагрузки и напряжением.

Так как $\cos \varphi$ положителен в пределах от $+90^\circ$ до -90° , то при указанных значениях угла сдвига фаз вращающий момент ваттметра положителен и его стрелка

отклоняется в правильном направлении, т. е. слева (от нуля) направо (к наибольшему делению шкалы). Эти пределы по углу охватывают крайние случаи измерения мощности как с отстающим током (при индуктивной нагрузке), так и с опережающим током (при емкостной нагрузке). Для углов φ , больших 90° , косинус отрицателен.

Поэтому вращающий момент изменяет знак на обратный. Увеличение угла сдвига между током и напряжением сверх 90° соответствует изменению направления передачи мощности.

Необходимо особое внимание обратить на то, что показания ваттметра также будут отрицательны, если изменить на обратное направление тока в одной из цепей ваттметра: в цепи тока или в цепи напряжения, хотя угол φ при этом и будет меньше 90° . Это свойство ваттметра реагировать на направление мощности (полярность ваттметра) необходимо учитывать при включении его в схему измерений.

Обычно для переносных ваттметров однополярные генераторные зажимы располагаются с левой стороны корпуса прибора и обозначаются звездочкой.

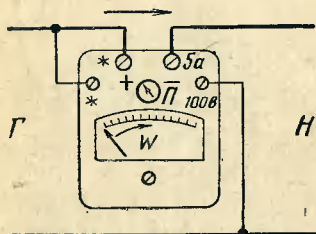
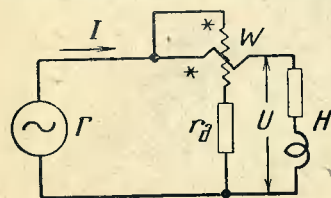


Рис. 1. Измерение мощности ваттметром.

G —генератор; H —нагрузка; W —ваттметр; r_d —добавочное сопротивление в цепи напряжения ваттметра; Π —переключатель полярности ваттметра.

При подключении этих зажимов со стороны питания стрелка ваттметра отклоняется вправо, т. е. в направлении передачи мощности. Сказанное поясняется рис. 1.

Переносные ваттметры всегда снабжаются переключателем полярности, изменяющим направление тока в цепи напряжения, что дает возможность при измерении изменять полярность ваттметра без пересоединения проводов питания на его зажимах. Это бывает необходимо при измерении мощности трехфазной установки по схеме двух ваттметров, о чем будет сказано ниже.

Переносные ваттметры, как правило, выполняются

многопредельными по току и по напряжению. Нижний предел по току может составлять десятки миллиампер, верхний обычно выше 10 а не делается. По напряжению ваттметры выполняются на пределы от 30 до 600 в. Для измерения посредством трансформаторов тока и трансформаторов напряжения применяются переносные ваттметры с номинальным током 5 а и номинальным напряжением 100 в.

Предел измерения по мощности в ваттах зависит от пределов измерения по току и напряжению. Поэтому шкала переносного (лабораторного) ваттметра градуируется в делениях, число которых чаще всего бывает 75, 100 или 150, а для каждого сочетания пределов по току и напряжению дается постоянная ваттметра, т. е. число ватт, приходящееся на одно деление шкалы.

Как правило, переносные (лабораторные) ваттметры нормального исполнения градуируются при $\cos \varphi = 1$. Поэтому предел измерения по мощности ваттметра определяется перемножением предела по току на предел по напряжению. Так, например, если у ваттметра предел по току взят $I_n = 2,5$ а, а предел по напряжению $U_n = 300$ в, то предел измерения по мощности в ваттах $P_n = I_n U_n = 2,5 \cdot 300 = 750$ вт. Если при этом шкала имеет $\alpha_n = 150$ делений, то постоянная ваттметра равна

$$C_{\text{вт}} = \frac{I_n U_n}{\alpha_n} = \frac{2,5 \cdot 300}{150} = 5 \text{ вт/1}^\circ.$$

Если при измерении стрелка ваттметра показывает α делений, то измеряемая мощность равна

$$P = C_{\text{вт}} \alpha \text{ вт.} \quad (8)$$

Для измерения мощности в цепях с низким коэффициентом мощности применяются специальные малокосинусные ваттметры, у которых полное отклонение стрелки при номинальных токе и напряжении имеет место при $\cos \varphi = 0,1$ или другом значении, указанном на ваттметре. Для таких ваттметров постоянная ваттметра равна

$$C_{\text{вт}} = \frac{I_n U_n \cos \varphi_n}{\alpha_n}, \quad (9)$$

где $\cos \varphi_n$ — значение $\cos \varphi$, указанное на шкале ваттметра. Постоянная малокосинусных ваттметров обычно дается заводом-изготовителем для каждого предела измерения.

Современные переносные ваттметры выпускаются отечественными заводами с широкими пределами измерений, с различными параметрами цепей и всех классов точности, начиная от 0,1 и ниже. В приложении приведены типы и параметры наиболее распространенных переносных ваттметров, включая и трехфазные.

Щитовые ваттметры обычно изготавливаются трехфазными (по схеме двух ваттметров) и в большинстве своем градуируются для включения с определенными по коэффициенту трансформации трансформаторами тока и трансформаторами напряжения. Для установок низкого напряжения щитовые ваттметры часто изготавливаются для включения токовых цепей через трансформаторы тока и для непосредственного включения цепей напряжения (полукосвенное включение).

Возможные случаи измерения мощности. Выработка и передача энергии на высоком напряжении производится по трехфазной уравновешенной схеме без нулевого провода, при практически симметричной и равномерной нагрузке по фазам.

Распределительные сети 6—10 кВ также выполняются трехфазными, трехпроводными. Распределение же энергии на напряжении до 1 000 в производится обычно трехфазными, четырехпроводными линиями (три фазы и нуль), дающими возможность использовать линейные напряжения для включения двигателей, а фазные — для освещения. В связи с развитием электрификации сельского хозяйства получают развитие однофазные сети для питания электродвигателей. Поэтому четырехпроводные сети напряжением до 1 000 в, как правило, имеют неравномерную нагрузку по фазам, а порой и несимметричную. Это особенно относится к заводским сетям, строительным площадкам, где большую долю однофазной нагрузки составляют сварочные аппараты.

В связи со сказанным возможные случаи измерения мощности трехфазных установок сводятся к следующему.

1. Нагрузка симметрична и равномерна по фазам. Звезда фазных (и линейных) напряжений симметрична, т. е. фазные напряжения сдвинуты друг относительно друга на 120° . Токи нагрузки по фазам равны между собой и имеют во всех фазах одинаковые сдвиги относительно фазных напряжений (полная симметрия).

2. Звезда фазных (и линейных) напряжений симметрична, как и выше, но токи нагрузки по величине и фазе не равны между собой (простая асимметрия) как для трехфазных трехпроводных, так и трехфазных четырехпроводных установок.

3. Звезда фазных (и линейных) напряжений искажена: фазные напряжения различны по величине и сдвиг между ними отличается от 120° . Токи нагрузки по величине и фазе не равны между собой (сложная асимметрия) для трехфазных трехпроводных и для трехфазных четырехпроводных установок.

Измерение активной мощности при полной симметрии может производиться путем измерения мощности в одной любой фазе. Для определения мощности трехфазного тока полученный результат измерений умножается на три:

$$P = 3P_\phi. \quad (10)$$

Принципиальная схема измерения показана на рис. 2 для двух характерных случаев: *а* — нулевая точка трехфазной установки доступна и *б* — нулевая точка недоступна и для измерения использована искусственная нулевая точка, созданная сопротивлениями r , равными по величине внутреннему сопротивлению цепи напряжения ваттметра.

Измерение активной мощности при простой асимметрии в трехфазных установках без нулевого провода является наиболее распространенным и охватывает большинство установок высокого напряжения, вырабатывающих, распределяющих и потребляющих электроэнергию. Частным случаем является полная симметрия (например, асинхронный электродвигатель).

Мощность в этом случае могла бы быть получена путем измерения тремя ваттметрами мощности каждой фазы и суммирования результатов измерения. Для по-

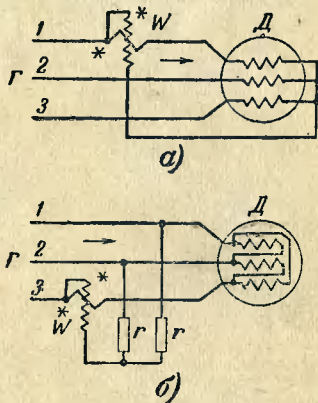


Рис. 2. Измерение мощности при симметричной и равномерной нагрузке фаз.

а — нулевая точка доступна; *б* — нулевая точка недоступна. *G* — генератор; *D* — двигатель; *W* — ваттметр; *r* — сопротивления, равные по величине внутреннему сопротивлению цепи напряжения ваттметра.

лучения фазного напряжения пришлось бы цепи напряжений ваттметров включить в звезду.

Однако повсеместное распространение в этом случае получила так называемая схема двух ваттметров (схема Арона), которая дает возможность обойтись двумя ваттметрами, двумя трансформаторами тока и двумя трансформаторами напряжения и, как будет показано ниже,

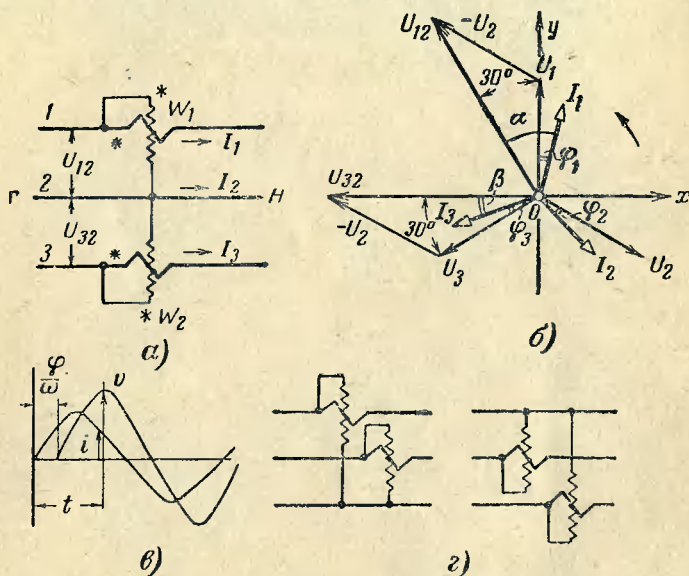


Рис. 3. Принципиальная схема двух ваттметров.

α —схема включения ваттметров; β —векторная диаграмма ($\alpha = 30^\circ + \varphi_1$; $\beta = 30^\circ - \varphi_2$); c —мгновенные значения напряжения и тока для момента времени t ; z —варианты схем включения ваттметров.

дает правильные результаты и в случае сложной асимметрии в трехфазных установках без нулевого провода.

Поскольку схема двух ваттметров является основной при измерении мощности в трехфазных установках и обладает рядом особенностей, рассмотрим ее подробно.

Схема двух ваттметров. Принципиальная схема двух ваттметров изображена на рис. 3,а.

Как видно из схемы, токовая цепь первого ваттметра W_1 включена в фазу 1, причем генераторный зажим (отмеченный звездочкой) присоединен со стороны питания. Цепь напряжения этого ваттметра включена на ли-

нейное напряжение между фазами 1 и 2, и ее генераторный зажим присоединен к фазе 1. Токовая цепь второго ваттметра W_2 включена в фазу 3, причем ее генераторный зажим также подсоединен со стороны питания. Цепь напряжения второго ваттметра включена между фазами 3 и 2, а ее генераторный зажим присоединен к фазе 3.

Векторная диаграмма схемы двух ваттметров дана на рис. 3,б.

Напомним, что при построении векторных диаграмм условно принимаются потенциалы концов обмоток трехфазного симметричного источника тока, соединенного в звезду, выше потенциалов начал обмоток, потенциал которых равен нулю. Соответственно этому считают положительным направлением векторов направление от нулевого или от низшего потенциала к высшему, и тогда конец вектора, обозначенный острием стрелки, будет положительным. Вектор обозначается двумя индексами, из которых первый обозначает конец вектора (острие стрелки), а второй — начало. Если начало вектора имеет условный нулевой потенциал, то обычно второй индекс опускается. Так, например, фазное напряжение фазы 1 обозначается \dot{U}_{10} или \dot{U}_1 . Линейное напряжение между фазами 1 и 2, являющееся геометрической разностью этих двух фазных напряжений, обозначается $\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{U}_{12}$, и в то же время $\dot{U}_2 - \dot{U}_1 = \dot{U}_{21}$ является таким же вектором, но имеющим противоположное направление.

Из векторной диаграммы видно, что первый ваттметр измеряет мощность $P_1 = I_1 U_{12} \cos \alpha$ и второй $P_2 = I_3 U_{32} \cos \beta$. Алгебраическая сумма этих двух мощностей будет равняться мощности трехфазной уравновешенной системе (без нулевого провода) при любой нагрузке фаз, любой асимметрии фазных напряжений и любом чередовании фаз.

Для доказательства перейдем сначала от действующих значений напряжения и тока к их мгновенным значениям. В этом случае, как видно из рис. 3,в, для любого момента времени t мгновенное значение напряжения u и мгновенное значение тока i совпадают по фазе. Значит, мгновенное значение мощности p равно произведению мгновенных значений напряжения и тока.

Тогда мгновенная мощность, измеряемая первым ваттметром, в рассматриваемой схеме будет равна $p_1 = i_1 u_{12} =$

$= i_1(u_1 - u_2)$, а мгновенная мощность, измеряемая вторым ваттметром, $p_2 = i_3 u_{32} = i_3(u_3 - u_2)$.

Так как для трехфазной уравновешенной системы всегда $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ и, следовательно, $i_2 = -(i_1 + i_3)$, то

$$p_1 + p_2 = i_1(u_1 - u_2) + i_3(u_3 - u_2) = i_1 u_1 + i_3 u_3 - u_2(i_1 + i_3) = i_1 u_1 + i_2 u_2 + i_3 u_3. \quad (11)$$

Иными словами, сумма показаний обоих ваттметров равна сумме мгновенных мощностей всех трех фаз, т. е. равна мощности трехфазной системы (1).

Однако в практике нас интересуют не мгновенные, а действующие значения мощности. Для перехода к действующим значениям тока и напряжения учтем, что мгновенные значения напряжения и тока могут быть выражены в виде синусоидальных функций, а именно:

$$u = U_{\text{макс}} \sin \omega t \text{ и } i = I_{\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi),$$

где $U_{\text{макс}}$ и $I_{\text{макс}}$ — максимальные (амплитудные) значения напряжения и тока;

φ — угол сдвига фаз между напряжением и током;

ω — угловая частота переменного тока, причем

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T},$$

где f — частота переменного тока;

T — период колебаний.

Следовательно, мгновенная мощность может быть представлена как:

$$\begin{aligned} p &= ui = U_{\text{макс}} \sin \omega t I_{\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi) = \\ &= \frac{U_{\text{макс}} I_{\text{макс}}}{2} \cos \varphi - \frac{U_{\text{макс}} I_{\text{макс}}}{2} \cos(\omega t + \varphi) = \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi)^*, \end{aligned}$$

где U и I — действующие (среднеквадратичные или эффективные) значения напряжения и тока, измеряемые приборами.

* При тригонометрических преобразованиях использованы следующие соотношения

$$\sin^2 a = \frac{1 - \cos 2a}{2}; \quad \sin a \cos a = \frac{\sin 2a}{2};$$

$$\cos(a + b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b.$$

Как видно из последнего выражения, мгновенная мощность состоит из двух слагаемых: из постоянной части $UI \cos \varphi$, представляющей среднюю мощность за период, и переменной части $UI \cos(2\omega t + \varphi)$, имеющей амплитуду UI и изменяющейся по гармоническому закону с двойной частотой. Среднее значение этой составляющей мощности за период равно нулю. Таким образом, измеряемая ваттметром мощность равна

$$P = UI \cos \varphi. \quad (12)$$

Возвращаясь к формуле (11) и заменяя в ней мгновенные мощности действующими (12), получаем

$$P_1 + P_2 = I_1 U_1 \cos \varphi_1 + I_2 U_2 \cos \varphi_2 + I_3 U_3 \cos \varphi_3 = P. \quad (13)$$

Итак, мощность уравновешенной трехфазной системы (не имеющей нулевого провода) не зависит от величины нагрузки отдельных фаз и сдвига фаз, а также независимо от порядка следования фаз может быть измерена двумя ваттметрами, включенными по схеме рис. 3,а.

Включая ваттметры таким же порядком в другие фазы (см. рис. 3,б), можно показать, что результаты измерений не изменятся.

В частном случае при симметричной и равномерной нагрузке фаз мощность, измеряемая первым ваттметром, как

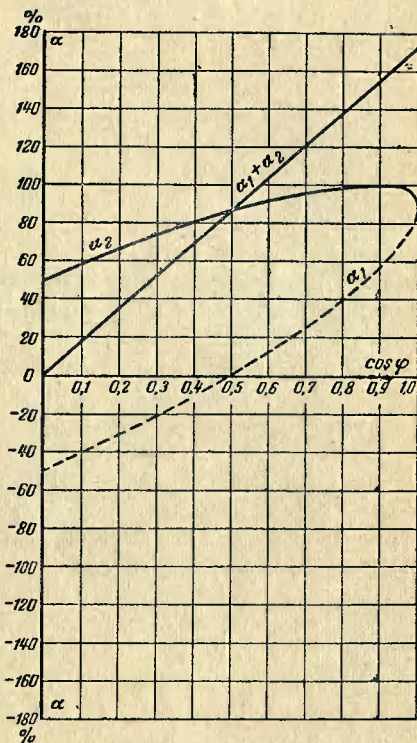


Рис. 4. Изменения показаний двух ваттметров в зависимости от изменения $\cos \varphi$ при измерении активной мощности. Кривые изображены для индуктивной нагрузки. При емкостной нагрузке необходимо переставить обозначения α_1 и α_2 .

это следует из векторной диаграммы, равна $P_1 = I_1 U_{12} \cos(30^\circ + \varphi)$. Вторым ваттметр измеряет

$$P_2 = I_2 U_{32} \cos(30^\circ - \varphi).$$

Сумма показаний ваттметров дает мощность трехфазной системы. Действительно, $U_{12} = U_{32} = U$ и $I_1 = I_3 = I$. Следовательно,

$$\begin{aligned} P &= P_1 + P_2 = IU [\cos(30^\circ + \varphi) + \cos(30^\circ - \varphi)] = \\ &= IU \cdot 2 \cos 30^\circ \cos \varphi = \sqrt{3} IU \cos \varphi. \end{aligned} \quad (14)$$

Зависимость показаний ваттметров от величины $\cos \varphi$.

Посмотрим, как изменяются показания ваттметров при изменении $\cos \varphi$ нагрузки, но при неизменных напряжениях и равномерной нагрузке фаз. Для этого, подставляя в выражения P_1 и P_2 (14) разные значения угла φ , в пределах $+90^\circ \div -90^\circ$, мы получим графическую зависимость показаний каждого ваттметра α_1 и α_2 и их суммы $\alpha_1 + \alpha_2$ от $\cos \varphi$ как для индуктивной, так и емкостной нагрузки. Эта зависимость приведена на рис. 4.

Отметим характерные показания ваттметров.

а) При $\cos \varphi = 1$ показания обоих ваттметров равны между собой и составляют 86,6% от полного отклонения стрелки каждого ваттметра (в ваттах или делениях шкалы), соответствующего $\cos \varphi = 1$ в однофазной схеме при тех же значениях тока и напряжения.

б) При $\cos \varphi = 0,5$ показания первого ваттметра, включенного на отстающую фазу¹, равны нулю, так как угол сдвига между напряжением, приложенным к ваттметру U_{12} , и током нагрузки I равен $30^\circ + 60^\circ = 90^\circ$, а $\cos 90^\circ = 0$. Вторым ваттметр, включенный на опережающую фазу, U_{32} даст 86,6% полного отклонения.

в) Если $\cos \varphi$ меньше 0,5, то угол между напряжением и током ваттметра W_1 становится больше 90° и его стрелка отклоняется влево. В этом случае полярность

¹ Направление вращения векторов трехфазной системы принято против часовой стрелки. Из двух векторов, следуемых друг за другом, опережающим будет тот, который раньше пересечет ось абсцисс x (см. рис. 3,б). Так, например, при порядке следования фаз U_1, U_2, U_3 из двух векторов \dot{U}_1 и \dot{U}_2 опережающим будет \dot{U}_1 и отстающим \dot{U}_2 ; для векторов \dot{U}_3 и \dot{U}_1 опережающим будет \dot{U}_3 и отстающим \dot{U}_1 и т. д.

ваттметра надо при помощи переключателя полярности изменить на обратную и при вычислении мощности показания этого ваттметра брать с отрицательным знаком, т. е. не прибавлять, а вычитать.

г) При $\cos \varphi = 0$ показания обоих ваттметров равны между собой и составляют 50% полного (для каждого ваттметра), но противоположны по знаку.

Так как измерения большей частью производятся при $\cos \varphi$, меньшем 1 (обычно в пределах $\cos \varphi = 0,7—0,8$), то показания ваттметров всегда будут различны. Например, при $\cos \varphi = 0,85$ один из ваттметров (второй) покажет 100%, а другой (первый) всего 50%, т. е. показания одного ваттметра будут вдвое больше показаний другого.

Попутно можно отметить, что схема двух ваттметров дает возможность достаточно надежно измерять активную мощность обычными ваттметрами и при низких значениях $\cos \varphi$ нагрузки. Это следует из кривых рис. 4, откуда видно, что при значениях $\cos \varphi$, близких к нулю, отклонения стрелок ваттметров при номинальных токах и напряжении составляет примерно 50% полного отклонения.

Определение $\cos \varphi$ нагрузки по показаниям ваттметров. Своеобразная зависимость показаний ваттметров от $\cos \varphi$ дает возможность определять его по показаниям ваттметров P_1 и P_2 в частном случае симметричной и равномерной нагрузки. Чтобы доказать это, вспомним, во-первых, что $\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}$ [см. формулу (7)]. Во-вторых, (см. ниже), разность показаний ваттметров при равномерной и симметричной нагрузке фаз, умноженная на $\sqrt{3}$ измеряет реактивную мощность:

$$Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2). \quad (15)$$

И наконец, отметим, что сумма показаний ваттметров измеряет активную мощность P [см. формулу (13)]. Сопоставляя (7), (13) и (15), видим, что $\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_2 - P_1}{P_1 + P_2}$, или после тригонометрического преобразования окончательно имеем

$$\cos \varphi = \frac{P_1 + P_2}{2\sqrt{P_1 - P_1P_2 + P_2}} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2\sqrt{\alpha_1 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2}}. \quad (16)$$

Формула (16) показывает, что $\cos \varphi$ может быть определен по показаниям ваттметров α_1 и α_2 .

Для практического определения коэффициента мощности в процессе измерения мощности удобно пользо-

ваться графической зависимостью отношения показаний ваттметров $\frac{P_1}{P_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ от значения $\cos \varphi$, приведенной на рис. 5.

Кривая составлена по приведенным выше соотношениям для однотипных ваттметров (т. е. имеющих одинаковую постоянную) для α_1 , меньших α_2 , при симметричной и равномерной нагрузке и синусоидальной форме тока. Если значение $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$

отрицательно, то отсчет производится в нижней (отрицательной) ветви кривой. Применение кривой рис. 5 иллюстрировано в примере 1 § 2.

К некоторым недостаткам схемы двух ваттметров относятся относительная сложность схемы, особенно применительно к установкам высокого напряжения с использова-

Рис. 5. Определение $\cos \varphi$ по отношению показаний двух ваттметров $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$.

нием трансформаторов тока и трансформаторов напряжения, и большая вероятность ошибочных соединений.

Измерение активной мощности при сложной асимметрии. Правильное измерение мощности в трехфазных четырехпроводных установках возможно только по схеме трех ваттметров, включенных в каждую фазу (рис. 6).

Общая мощность установки независимо от чередования фаз равна

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (17)$$

где P_1 , P_2 и P_3 , — мощности, измеренные каждым ваттметром.

Принцип измерения реактивной мощности. Реактивная мощность в трехфазных установках измеряется обычными переносными лабораторными или техниче-

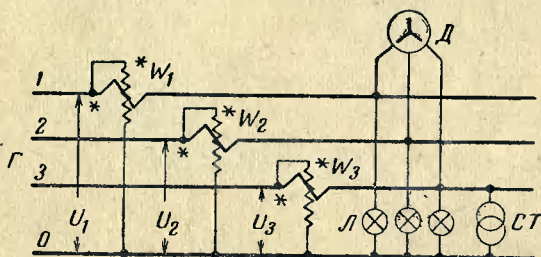


Рис. 6. Измерение мощности в трехфазной четырехпроводной сети.

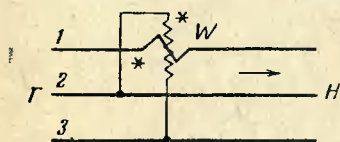
Γ —генератор; W —ваттметры; $Д$ —двигатели; $Л$ —лампы освещения; $СТ$ —сварочные трансформаторы.

скими ваттметрами, градуированными при $\cos \varphi = 1$, но по специальным схемам включения. Для измерения реактивной мощности в одной фазе должен применяться специальный, так называемый синусный ваттметр.

Характерной особенностью всех схем измерения реактивной мощности является необходимость получения сдвига в 90° между током и напряжением ваттметра, чтобы при $\cos \varphi = 1$ ($\sin \varphi = 0$) показание ваттметра было равно нулю, а при $\cos \varphi = 0$ ($\sin \varphi = 1$) было максимальным. В синусных ваттметрах это достигается путем применения специальных схем для получения сдвига в 90° между напряжением сети и током в цепи напряжения ваттметра. Работа этих схем зависит от частоты сети, и они широкого распространения не получили.

В трехфазных установках получение сдвига в 90° достигается путем сопряжения тока ваттметра с соответствующим линейным напряжением, имеющим сдвиг 90° по отношению к фазному напряжению.

Измерение реактивной мощности при полной симметрии. На рис. 7 изображена простейшая схема измерения реактивной мощности трехфазной установки без нулевого привода для случая равномерной и симметричной нагрузки фаз при помощи обычного (косинусного) ваттметра. Там же дана векторная диаграмма, из которой видно, что для принятого чередования фаз 1, 2, 3



в токовой цепи ваттметра протекает ток I_1 , фазы 1, имеющий сдвиг φ относительно фазного напряжения U_1 той же фазы, а к цепи напряжения подведено линейное напряжение $U_2-U_3 = U_{23}$, отстающее от фазного напряжения U_1 на угол 90° . В этом случае ваттметр измеряет мощность

$$Q_1 = I_1 U_{23} \cos(90^\circ - \varphi) = IU \sin \varphi.$$

Реактивная мощность трехфазной установки [см. формулу (3)] равна

$$Q = \sqrt{3} Q_1. \quad (18)$$

Широкое применение для измерения реактивной мощности при равномерной нагрузке фаз находит схема двух ваттметров для измерения активной мощности. Чтобы убедиться в том, что двумя ваттметрами, включенными по схеме Арона, можно измерять реактивную мощность, следует, во-первых, воспользовавшись векторной диаграммой на рис. 3,б, записать, что разность показаний ваттметров равна

$$P_2 - P_1 = IU [\cos(30^\circ - \varphi) - \cos(30^\circ + \varphi)] = IU \cdot 2 \sin 30^\circ \sin \varphi = IU \sin \varphi.$$

Во-вторых, нужно сравнить эту запись с формулой (3), и тогда получим, что реактивная мощность трехфазной установки равна

$$Q = \sqrt{3} (P_2 - P_1). \quad (19)$$

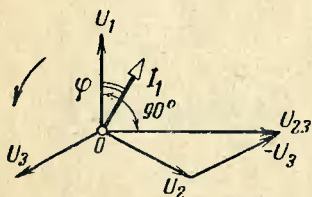


Рис. 7. Измерение реактивной мощности трехфазной установки без нулевого провода при симметричной и равномерной нагрузке фаз одним косинусным ваттметром.

Основное удобство схемы двух ваттметров заключается в том, что она одновременно используется для измерения и активной и реактивной мощности. Однако не надо забывать, что результаты измерений реактивной мощности правильны лишь при равномерной нагрузке и при отсутствии нулевого провода.

Измерение реактивной мощности при простой асимметрии. При измерении реактивной мощности трехфазной установки без нулевого провода и при неравномерной нагрузке фаз, но при симметрии фазовых напряжений (простая асимметрия) большое распространение нашла схема двух ваттметров с искусственной нулевой точкой (рис. 8).

Ваттметры W_1 и W_2 должны иметь одинаковое внутреннее сопротивление цепей напряжения. Схема дает правильные результаты для порядка следования фаз, указанного на векторной диаграмме. При включении ваттметров необходимо обращать внимание на правильность присоединения генераторных зажимов ваттметров (отмеченных звездочками) в соответствии с принципиальной схемой.

Из векторной диаграммы следует, что первый ваттметр измеряет мощность $P_1 = I_1 U_{03} \cos(60^\circ - \varphi) = I_1 U_\phi \sin(30^\circ + \varphi)$. Второй ваттметр измеряет $P_2 = -I_3 U_{10} \cos(120^\circ - \varphi) = I_3 U_\phi \sin(30^\circ - \varphi)$.

Сумма показаний обоих ваттметров (с учетом знака показаний), умноженная на $\sqrt{3}$, дает значение реактивной мощности

$$Q = \sqrt{3} [I_1 U_\phi \sin(30^\circ + \varphi) + I_3 U_\phi \sin(30^\circ - \varphi)] = \sqrt{3} (P_1 + P_2). \quad (20)$$

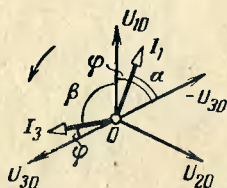
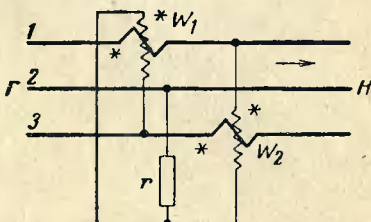


Рис. 8. Измерение реактивной мощности по схеме двух ваттметров с нулевой точкой.

W_1 и W_2 — однотипные ваттметры; r — сопротивление, равное по величине сопротивлению цепи напряжения каждого ваттметра.

Зависимость показаний ваттметров от $\cos \varphi$:

При равномерной нагрузке фаз, т. е. при $I_1 = I_2 = I_3$,

$$Q = \sqrt{3} (IU_{\phi} \sqrt{3} \sin \varphi) = \sqrt{3} IU \sin \varphi, \quad (21)$$

так как $\sqrt{3}U_{\phi} = U$.

Из формулы (21) следует, что при неизменных напряжениях и равномерной нагрузке фаз показания ваттметров изменяются в зависимости от величины угла φ .

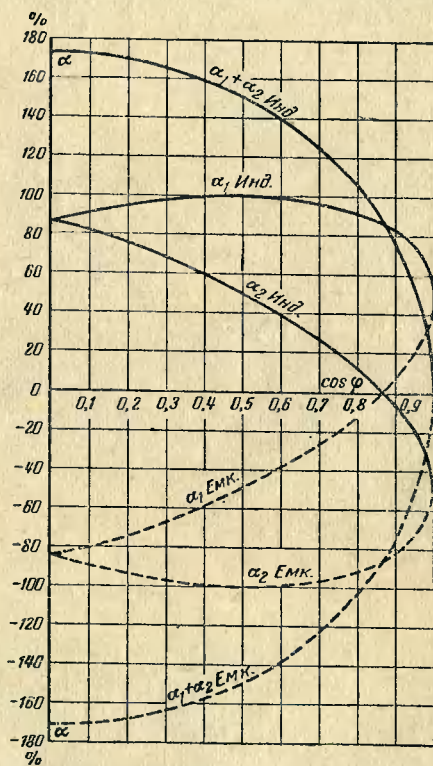


Рис. 9. Изменения показаний двух ваттметров в зависимости от изменения $\cos \varphi$ при измерении реактивной мощности. Сплошные кривые — для индуктивной нагрузки; пунктирные — для емкостной.

Показания обоих ваттметров одинаковы только при $\cos \varphi = 0$ ($\sin \varphi = 1$). При $\cos \varphi = 1$ ($\sin \varphi = 0$) показания ваттметров равны по величине, но противоположны по знаку. При $\cos \varphi = 0,86$ ($\sin \varphi = 0,5$) показания одного из ваттметров (второго) равны нулю, а другого (первого) положительны.

На рис. 9 приведена графическая зависимость показаний каждого ваттметра и суммы их показаний в зависимости от изменения $\cos \varphi$ при неизменных номинальных токах и напряжениях. Сплошные кривые соответствуют индуктивной нагрузке, пунктирные — емкостной.

Кривая на рис. 10 дает возможность при равномерной нагрузке фаз по показаниям ваттметров определять $\cos \varphi$ нагрузки.

В трехфазных трехпроводных, а также и четырехпроводных установках с неравномерной нагрузкой фаз (но при симметрии фазных напряжений) применяется схема трех ваттметров, изображенная на рис. 11.

Из векторной диаграммы, изображенной на том же рисунке, следует, что каждый ваттметр измеряет мощность

$$Q = IU \cos(90^\circ - \varphi) = IU \sin \varphi.$$

Общая реактивная мощность, очевидно, равна сумме показаний всех ваттметров, деленной на $\sqrt{3}$, так как каждый ваттметр измеряет в $\sqrt{3}$ раз больше мощности каждой фазы

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{\sqrt{3}}.$$

При равномерной нагрузке фаз, так как $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q'$,

$$Q = \frac{3Q'}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} IU \sin \varphi. \quad (22)$$

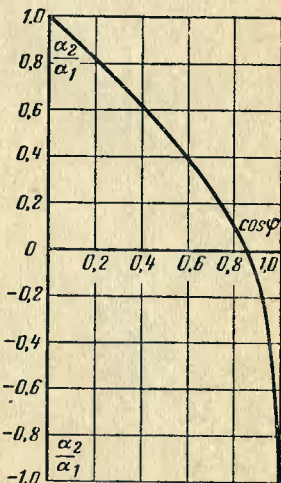


Рис. 10. Определение $\cos \varphi$ по отношению $\frac{\alpha_2}{\alpha_1}$.

Измерение реактивной мощности при сложной асимметрии. При неравномерной и несимметричной нагрузке трехфазных четырехпроводных установок реактивная мощность может быть измерена только при помощи трех синусных ваттметров, включаемых по схеме, приведенной на рис. 6.

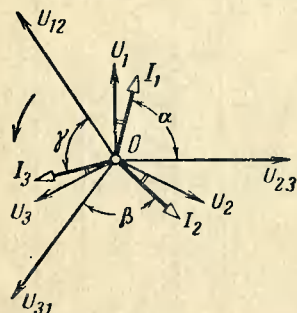
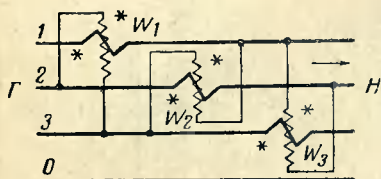


Рис. 11. Измерение реактивной мощности в трехфазной четырехпроводной сети с неравномерной нагрузкой фаз, но симметричной звездой фазных напряжений.

Измерение полной (кажущейся) мощности. Для измерения полной мощности специальных приборов промышленность не выпускает. Полная мощность обычно определяется как произведение измеренных токов напряжений в вольт-амперах или киловольт-амперах (*ва*, *кВа*).

Измерение мощности постоянного и выпрямленного токов. При проведении различных испытаний машин постоянного тока, а также в других случаях необходимо измерять мощность постоянного тока. Как правило, мощность в цепях постоянного тока измеряется путем измерения тока и

напряжения, произведение которых дает значение мощности в ваттах. Однако для измерения мощности могут применяться также переносные электродинамические ваттметры, шкала которых градуируется при $\cos \varphi = 1$.

При измерении мощности в цепях выпрямленного переменного тока (например, при испытании силовых выпрямительных устройств, в цепях ионного возбуждения машин и т. п.) необходимо правильно выбирать приборы. Дело в том, что магнитоэлектрические амперметры и вольтметры (пригодные только для постоянного тока) измеряют средние значения тока и напряжения. В отличие от них электромагнитные и электродинамические амперметры и вольтметры (пригодные как для по-

стоянного, так и для переменного тока) измеряют действующие значения тока (эффективные, средние квадратичные).

Из сказанного вытекает следующее:

1. При включении в цепь постоянного тока, источником которого служит, например, аккумуляторная батарея или вращающийся генератор постоянного тока, показания магнитоэлектрических и электромагнитных или электродинамических приборов будут одинаковы, потому что для хорошо сглаженного постоянного тока среднее, эффективное и амплитудное значения одинаковы.

2. Если измерять выпрямленный синусоидальный ток без сглаживающего фильтра амперметром магнитоэлектрической системы и амперметром электромагнитной системы одного и того же класса точности, включенными последовательно в цепь, то показания их будут различны.

Действительно, для синусоидального двухполупериодного выпрямленного тока среднее значение равно

$$I_{\text{ср}} = \frac{2I_{\text{макс}}}{\pi} = 0,637I_{\text{макс}},$$

а действующее значение того же тока

$$I = \frac{I_{\text{макс}}}{\sqrt{2}} = 0,707I_{\text{макс}}.$$

Значит, показания электромагнитного амперметра будут на 11% больше показаний магнитоэлектрического амперметра, так как $0,707 : 0,637 \cdot 100\% = 11\%$.

При измерении мощности в цепях выпрямленного переменного тока необходимо применять амперметр и вольтметр электромагнитной или электродинамической системы. Приборы измеряют действующее значение пульсирующего тока и напряжения. Весьма целесообразно в таких случаях измерение мощности производить непосредственно ваттметром.

Ниже рассматриваются практические схемы измерения мощности переменного тока применительно к различного рода испытаниям электрооборудования. В каж-

дом отдельном случае даны указания по выбору приборов и оценке результатов измерения. В конце брошюры приводятся сведения по осциллографированию мощности.

2. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ТРЕХФАЗНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Измерение мощности генераторов производится главным образом при тепловых испытаниях и определении коэффициента полезного действия (к. п. д.) генератора или первичного двигателя.

Для трехфазных генераторов высокого напряжения, работающих на трехфазную сеть без нулевого провода, наибольшее применение получила схема двух ваттметров — схема Арона.

Схема трех ваттметров в основном применяется при измерении мощности трехфазных генераторов низкого напряжения с нулевым проводом, где схема двух ваттметров неприменима. Кроме того, схема трех ваттметров иногда применяется при точных измерениях мощных генераторов высокого напряжения.

Схема двух ваттметров. Полная схема двух ваттметров для измерения мощности генератора высокого напряжения приведена на рис. 12. На схеме звездочкой отмечены генераторные зажимы ваттметров. Однополярные зажимы первичных и вторичных обмоток измерительных трансформаторов обозначены в соответствии с ГОСТ¹.

Собранную схему измерений перед включением нужно тщательно проверить и убедиться в том, что она точно соответствует принципиальной схеме. Необходимость проверки особенно важна, так как возможно большое

¹ Для трансформаторов тока входные (генераторные) зажимы обозначаются для первичной цепи буквой L_1 , а для вторичной — I_1 ; выходные зажимы обозначаются соответственно L_2 и I_2 .

Для трансформаторов напряжения входные зажимы обозначаются для первичной обмотки буквой A и для вторичной — a ; выходные зажимы соответственно X и x .

Отметим, что результаты измерения будут правильны, если в качестве генераторных зажимов будут использованы выходные зажимы L_2 , I_2 . Важно лишь, чтобы генераторные зажимы первичной и вторичной обмоток были однополярны.

количество неправильных соединений в схеме, которые по показаниям приборов трудно обнаруживаются, но приводят при измерениях к ложным результатам.

Если используется существующая схема измерения мощности и лабораторные приборы включаются в цепи щитового трехфазного ваттметра, то необходимо убе-

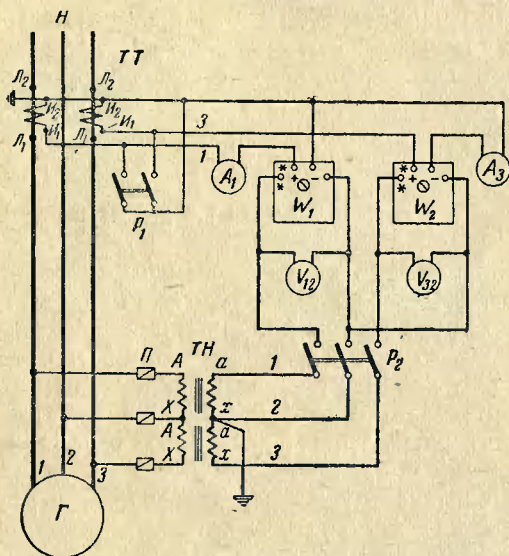


Рис. 12. Схема двух ваттметров для измерения мощности генераторов высокого напряжения.

Г—генератор, мощность которого измеряется; ТТ— трансформаторы тока; ТН— трансформаторы напряжения; П— предохранители; P₁— рубильник для закорачивания токовых цепей приборов; P₂— рубильник для отключения цепей напряжения приборов.

даться в правильности этой схемы. При равномерной нагрузке фаз (что обычно имеет место у мощных генераторов) для проверки схемы нужно у щитового ваттметра поменять местами провода цепей напряжения крайних фаз 1 и 3. Если схема правильна, то при переключении указанных проводов стрелка ваттметра должна показать нуль.

При длительных испытаниях машины целесообразно предусмотреть двухполюсный рубильник P₁ для закора-

чивания токовых цепей ваттметров и трехполюсный рубильник P_2 для отключения цепей напряжения, как это указано на схеме.

Измеряемая мощность определяется по выражению

$$P = K(a_1 + a_2),$$

где a_1 и a_2 — показания однотипных ваттметров в делениях шкалы.

Постоянный коэффициент K подсчитывается предварительно, исходя из значений коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов и постоянной ваттметра, по выражению

$$K = C_{вт} k_{тт} k_{тн} \cdot 10^{-3} \text{ [квт/1}^\circ\text{]}$$

где $C_{вт}$ — постоянная ваттметра (цена деления, *вт*); $k_{тт}$ и $k_{тн}$ — коэффициенты трансформации трансформаторов тока и трансформаторов напряжения.

В зависимости от целей испытаний и необходимой точности измерений выбирается класс измерительных приборов и решается вопрос о необходимости применения лабораторных трансформаторов тока и трансформаторов напряжения.

В большинстве случаев удовлетворяются результатами измерений мощности ваттметрами класса 0,5 с использованием имеющихся в установке измерительных трансформаторов класса 0,5.

Пределы измерения ваттметров по току и напряжению должны в этом случае соответствовать номинальному вторичному току трансформаторов тока 5 *а* и номинальному вторичному напряжению трансформаторов напряжения 100 *в*. При отсутствии таких ваттметров можно применить ваттметры с пределами 2,5—5 *а* и 150—300 *в*, например типа Д 527/3 или Д 529/4 тоже с пределом по напряжению 150 *в* и т. п., хотя отклонение стрелок у этих ваттметров будет меньше.

Пример 1. Измеряется мощность генератора типа Т2-25-2 31 250 *кв*а, 6 300 *в*, $\cos \varphi_n = 0,8$. Используются имеющиеся в установке трансформаторы тока $\frac{3000}{5}$ *а* и трансформаторы напряжения $\frac{6000}{100}$ *в* класса точности 0,5.

Применены два лабораторных ваттметра класса 0,5 с номинальным током 5 а и с номинальным напряжением 100 в, число делений шкалы 100.

Определяем постоянную ваттметра

$$C_{\text{вт}} = \frac{I_n U_n}{\alpha_n} = \frac{5 \cdot 100}{100} = 5 \text{ вт/1}^\circ.$$

Вычисляем коэффициент K , на который надо умножить показания каждого ваттметра, отсчитанные в делениях

$$K = C_{\text{вт}} k_{\text{ТТ}} k_{\text{ГН}} 10^{-3} = 5 \cdot \frac{3000}{5} \cdot \frac{6000}{100} 10^{-3} = 180 \text{ квт/1}^\circ.$$

При одновременном отсчете показания первого ваттметра $\alpha_1 = 33,5^\circ$ и показания второго $\alpha_2 = 82^\circ$. Оба показания лежат в положительной области (переключатели цепи напряжения обоих ваттметров установлены на прямую полярность, отклонения стрелок по часовой стрелке). Тогда измеряемая мощность

$$P = K(\alpha_1 + \alpha_2) = 180(33,5 + 82) = 20790 \text{ квт}.$$

Так как нагрузка генератора практически равномерна, то значение $\cos \varphi$ определяем по кривой рис. 5. В нашем случае $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{33,5}{82} = 0,41$, чему по кривой соответствует $\cos \varphi = 0,81$.

С большим успехом может быть использован трехфазный ваттметр типа Д-558 класса 0,2 с пределами измерения 5 а и 100 в, собранный по схеме двух ваттметров. Преимущество этого ваттметра в том, что отсчет производится лишь по одному прибору, что повышает точность измерений. Недостаток — невозможность определять значение $\cos \varphi$ по отношению показаний отдельных ваттметров. В этом случае коэффициент мощности определяется по общеизвестной формуле

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI},$$

где P — в киловаттах (квт);

I — в амперах (а);

U — в киловольтах (кв).

Проверка режима измерительных трансформаторов.
При использовании установленных измерительных трансформаторов надо проверить режим их работы, так как погрешности трансформаторов тока и трансформаторов напряжения зависят от нагрузки их вторичных

обмоток и с увеличением нагрузки увеличиваются. Иными словами, перед включением комплекта лабораторных приборов необходимо проверить степень нагрузки измерительных трансформаторов.

Нагрузка трансформаторов тока оценивается путем приближенного расчета и для обычного случая включения трех трансформаторов тока в звезду с нулевым проводом определяется по выражению

$$z_{\text{ТТ}} = z + r_{\text{пр}} + r_{\text{конт}}, \quad (23)$$

где z — суммарное сопротивление токовых цепей всех приборов, включенных на данный трансформатор тока;

$r_{\text{пр}}$ — сопротивление провода в один конец¹;

$r_{\text{конт}}$ — суммарное сопротивление контактов (принимается 0,05 — 0,1 ом).

Для простоты подсчетов составляющие нагрузки складываются арифметически.

При соединении трансформаторов тока в неполную звезду с нулевым проводом нагрузка трансформаторов тока определяется по выражению

$$z_{\text{ТТ}} = \sqrt{3}z + r_{\text{пр}} + r_{\text{ком}}. \quad (23')$$

Необходимо, чтобы с учетом сопротивления токовых цепей лабораторных приборов нагрузки трансформаторов тока не превосходили номинального значения (в омах) для своего класса точности, т. е.

$$z_{\text{ТТ}} = \frac{P_{\text{н}}}{25^*}, \quad (24)$$

где $P_{\text{н}}$ — номинальная мощность (ва) трансформатора тока с вторичным током 5 а для класса 0,5.

Если в установке имеются трансформаторы тока с отдельными малонагруженными сердечниками (для измерений или учета энергии), то лабораторные приборы присоединяются к обмоткам этих сердечников.

¹ При соединении в звезду ток в нулевом проводе отсутствует. Поэтому учитывается сопротивление проводов только в один конец.

* Число 25 в знаменателе — это квадрат номинального тока 5 а. Если произвести действия над размерностями, то, деля [ва] (которые измеряется P) на [а²], получим [в : а], т. е. [ом].

При включении приборов на действующей установке запрещается под нагрузкой размыкать вторичные цепи трансформаторов тока во избежание поражения высоким напряжением, индуктируемым при разрыве тока во вторичной обмотке, и из-за опасности пробоя изоляции вторичной обмотки трансформатора тока.

Нагрузка трансформаторов напряжения также может быть оценена путем подсчета. Если мощность трансформатора равна P_n [ва] для класса 0,5, то предельная нагрузка на фазу P_ϕ определяется в зависимости от схемы соединения трансформаторов из следующих соотношений.

1. При соединении двух однофазных трансформаторов по схеме открытого треугольника

$$P_\phi = \frac{P_n}{\sqrt{3}}. \quad (25)$$

2. Для трехфазного трансформатора напряжения общей мощностью P_n

$$P_\phi = \frac{P_n}{3}. \quad (26)$$

3. Для однофазных трансформаторов, соединенных в звезду:

$$P_\phi = P_n. \quad (27)$$

Пример 2. Мощность генератора с параметрами, приведенными в примере 1, измеряется трехфазным лабораторным ваттметром класса 0,2 (типа Д-558) с пределами измерения 5 а и 100 в, число делений шкалы 100.

Постоянная ваттметра равна

$$C_{вт} = 2 \frac{I_n U_n}{\alpha_n} = 2 \cdot \frac{5 \cdot 100}{100} = 10 \text{ вт/1}^\circ$$

(здесь коэффициент 2 учитывает наличие двух измерительных элементов ваттметра).

Коэффициент K , на который надо умножить показания ваттметра в делениях, равен:

$$K = C_{вт} \cdot k_{ТГ} \cdot k_{ТН} \cdot 10^{-3} = 10 \cdot \frac{3000}{5} \cdot \frac{6000}{100} \cdot 10^{-3} = 360 \text{ квт/1}^\circ.$$

Проверяем степень нагрузки измерительных трансформаторов.

Установленные трансформаторы тока типа ТПШФА имеют предельную мощность сердечника при классе 0,5, равную 30 ва, чему [согласно формуле (24)] соответствует допустимое сопротивление на фазу

$z_{\text{ТТ}} = \frac{P_{\text{н}}}{I_{\text{н}}^2} = \frac{30}{25} = 1,2 \text{ ом}$. В цепь трансформатора тока включены токовые обмотки амперметра, ваттметра активной мощности, счетчика активной энергии и счетчика реактивной энергии. Длина соединительного провода в один конец между трансформаторами тока и панелью с приборами около 150 м, сечение провода 4 мм² (медь).

Полагая собственное потребление мощности токовыми цепями приборов в среднем по 1 ва на прибор, будем иметь сопротивление всех приборов

$$z = \frac{P_{\text{н}}}{I^2} = \frac{5}{25} = 0,2 \text{ ом}.$$

Сопротивление провода

$$r_{\text{п.р}} = 0,0175 \frac{l}{q} = 0,0175 \cdot \frac{150}{4} = 0,65 \text{ ом},$$

где l — длина провода, м;
 q — сечение провода, мм².

Сопротивление контактов принимаем $r_{\text{конт}} = 0,1 \text{ ом}$ и, следовательно, реальная нагрузка на каждый трансформатор тока согласно формуле (23) равна $z_{\text{ТТ}} = 0,2 + 0,65 + 0,1 = 0,95 \text{ ом}$.

Сопротивление токовой цепи лабораторного ваттметра и схемы не превышает 0,05 ом. Значит общая нагрузка на трансформатор тока при измерении мощности составит примерно 1 ом, что меньше предельной мощности сердечника для класса 0,5.

Трансформаторы напряжения типа НОМ-6, $\frac{6000}{100}$ в имеют мощность 30 ва при классе точности 0,5 и соединены по схеме открытого треугольника. Допустимая нагрузка на фазу определяется по формуле (25) и составляет $P_{\phi} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3}} = \frac{30}{\sqrt{3}} = 17,3 \text{ ва}$.

Полагая потребление цепей напряжения: вольтметра 6 ва, ваттметров активной и реактивной энергии в среднем по 2 ва и счетчиков активной и реактивной энергии по 2,5 ва, определим реальную нагрузку на фазу $P = 6 + 2 + 2 + 2,5 + 2,5 = 15 \text{ ва}$, что ниже допустимого значения для класса 0,5.

Таким образом, поверочный расчет показал, что измерительные трансформаторы не перегружены и по точности не должны выходить за пределы класса 0,5.

Если прикидочный расчет показывает, что измерительные трансформаторы перегружены, то рекомендуется повторить расчет с применением точных данных потребляемой мощности приборов или же определить нагрузки измерительных трансформаторов путем измерения тока и напряжения.

При измерении мощности отсчитано показание ваттметра $\alpha = 57,8^\circ$. Тогда $P = K\alpha = 360 \cdot 57,8 = 20\,808 \text{ квт}$.

Одновременно были измерены ток статора $I = 2\,380 \text{ а}$ и напряжение $U = 6\,300 \text{ в}$ и определен $\cos \varphi = \frac{20\,808}{\sqrt{3} \cdot 2\,380 \cdot 6,3} = 0,805$.

При испытании генератора заданный режим по нагрузке и $\cos \varphi$ поддерживается по ваттметрам и определяется по кривой рис. 5, где α_1 — показания ваттметра, дающего меньшие показания, и α_2 — показания ваттметра, дающего большие показания.

Контроль за напряжением и токовой нагрузкой по фазам производится по вольтметрам и амперметрам, причем класс точности их может быть ниже класса точности ваттметров (могут быть использованы и щитовые приборы), поскольку их показания при определении мощности не используются.

Следует подчеркнуть необходимость одновременного отсчета показаний по обоим ваттметрам при устойчивой нагрузке. При особо точных измерениях мощности (определение ж. п. д. или исследование машины) применяются проверенные непосредственно перед измерением лабораторные ваттметры класса 0,2 или 0,1, проверенные лабораторные трансформаторы тока не ниже класса 0,2 с изоляционными втулками на соответствующее напряжение и проверенные лабораторные трансформаторы напряжения не ниже класса 0,2.

Изоляция лабораторных измерительных трансформаторов должна быть проверена в соответствии с действующими нормами. Установка лабораторных трансформаторов должна выполняться с соблюдением действующих правил техники безопасности и соблюдением габаритов согласно Правилам технической эксплуатации. Трансформаторы напряжения должны подключаться после высоковольтных предохранителей имеющихся трансформаторов напряжения.

Учет погрешности ваттметров и измерительных трансформаторов. Для повышения точности измерения в отдельных случаях учитываются погрешности ваттметров и измерительных трансформаторов, даваемые в протоколах их поверки (см. также § 9).

Действительное значение измеренной мощности определяется по выражению

$$P = K \left[(\alpha_1 + \theta_1) \left(1 - \frac{f'_{TT} + f'_{TH} + f'_\delta}{100} \right) + (\alpha_2 + \theta_2) \left(1 - \frac{f''_{TT} + f''_{TH} + f''_\delta}{100} \right) \right], \quad (28)$$

где θ_1 и θ_2 — поправки ваттметров с учетом знака согласно протоколам их поверки;

$f'_{ТТ}, f''_{ТТ}, f'_{ТН}, f''_{ТН}$ — погрешности в процентах по коэффициенту трансформации трансформаторов тока и трансформаторов напряжения согласно протоколам поверки;

f'_δ и f''_δ — результирующие угловые погрешности измерительных трансформаторов, %.

Если мощность измеряется при $1,0 > \cos \varphi > 0,5$, то показания обоих ваттметров при равномерной нагрузке фаз не равны между собой и результирующие угловые погрешности измерительных трансформаторов в процентах, подставляемые в расчетную формулу, определяются по следующим выражениям.

1. Для ваттметра с меньшими показаниями

$$f'_\delta = 0,0291 (\delta'_T - \delta'_H) \operatorname{tg} (30^\circ + \varphi). \quad (29)$$

2. Для ваттметра с большими показаниями

$$f''_\delta = 0,0291 (\delta'_H - \delta'_T) \operatorname{tg} (30^\circ - \varphi), \quad (30)$$

где δ_H и δ_T — угловые погрешности трансформаторов напряжения и трансформаторов тока в минутах, согласно протоколам для данной нагрузки.

Пример 3. Мощность генератора типа Т2-25-2 должна быть измерена с возможно большой точностью. Для этого установлены лабораторные трансформаторы тока класса $0,5 \frac{3000}{5} a$ и лабораторные трансформаторы напряжения $\frac{6000}{100} b$ класса 0,2. Ваттметры взяты класса 0,2 с пределами измерения $5 a$ и $100 b$ со шкалой 100 делений. Поправки ваттметров малы, и их не учитываем. Погрешности измерительных трансформаторов согласно протоколам их проверки приведены в табл. 1.

$$\text{Вычисляем } C_{вт} = \frac{5 \cdot 100}{100} = 5 \text{ вт/1}^\circ; \quad K = 5 \cdot \frac{3000}{5} \cdot \frac{6000}{100} 10^{-3} = 180 \text{ квт/1}^\circ.$$

При измерении имеем $\alpha_1 = 33,5^\circ$ и $\alpha_2 = 82^\circ$. Тогда

$$P = 180(33,5 + 82) = 20790 \text{ квт} \text{ и } \cos \varphi = 0,81 \text{ (см. пример 1).}$$

По тригонометрическим таблицам находим $\varphi \cong 36^\circ$. Определяем результирующие угловые погрешности измерительных трансформаторов.

Таблица 1

	Погрешность по току и напряжению соответственно, %	Угловая погрешность, мин
Трансформатор тока, фаза 1	+0,35	+30
То же, фаза 2	+0,25	+15
Трансформатор напряжения, фаза 1	+0,15	+10
То же, фаза 2	+0,10	+5

Для ваттметра с меньшими показаниями по формуле (29)

$$f'_8 = 0,0291 (30' - 10') \operatorname{tg} (30^\circ + 36^\circ) = 1,28 \%$$

Для ваттметра с большими показаниями по формуле (30)

$$f''_8 = 0,0291 (5' - 15') \operatorname{tg} (30^\circ - 36^\circ) = 0,04 \%$$

Тогда действительное значение измеряемой мощности по формуле (28)

$$P_d = 180 \left[33,5 \left(1 - \frac{0,35 + 0,15 + 1,28}{100} \right) + 82 \left(1 - \frac{0,25 + 0,1 + 0,04}{100} \right) \right] = 20\,600 \text{ квт.}$$

Сопоставляя результаты измерения мощности одного и того же генератора по примерам 1 и 3, можно увидеть, что введение поправок на измерительные трансформаторы уточняет результаты измерений.

Схема трех ваттметров для генераторов высокого напряжения. При точных измерениях мощности больших генераторов может применяться схема трех ваттметров, имеющая некоторые преимущества перед схемой двух ваттметров, хотя и требующая большего количества приборов.

Специфическим для схемы двух ваттметров является неудобство в наблюдении за нагрузкой отдельных фаз, а кроме того, возникновение угловой погрешности уже при $\cos \varphi = 1$, так как к ваттметрам при этом подводятся токи и напряжения, сдвинутые на 30° . При точных измерениях по схеме двух ваттметров нельзя не учитывать также угловой сдвиг между линейным напряжением на зажимах трансформаторов напряжения, включенных по схеме открытого треугольника, и на зажимах ваттметров. Этот сдвиг γ зависит от сопротивления r

соединительных проводов цепей напряжения и от тока нагрузки трансформатора напряжения и может достигать нескольких угловых минут. Приблизительно он может быть определен по выражению

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\sqrt{3}}{2} 0,01Ir. \quad (31)$$

Кроме того, в схеме двух ваттметров при значениях $\cos \varphi$ нагрузки, близких к 0,5, и токах, даже близких к номинальным, показания одного из ваттметров лежат в начале шкалы, где отсчет менее точен. Так, например, для ваттметра класса 0,5, имеющего шкалу 150 делений, наибольшая допустимая абсолютная погрешность равна $\frac{150 \cdot 0,5}{100} = 0,75$ деления, что следует из опре-

деления класса точности прибора¹. Значит, при небольших отклонениях стрелки ваттметра, например на деление 30, возможная погрешность F ваттметра для измеряемого значения будет значительно выше погрешности, определяемой числом класса и составит в данном случае $F = 0,5 \frac{150}{30} = 2,5\%$. Необходимо, однако, отметить, что значительная погрешность относится к меньшей доле измеряемой мощности и поэтому не имеет решающего значения.

Схема трех ваттметров свободна от указанных недостатков и дает правильные результаты измерения мощности при всех возможных случаях нагрузки и при любом порядке чередования фаз. Отсчет может производиться в правой части шкалы ваттметров, т. е. с наименьшими погрешностями. Дополнительная угловая погрешность, обуславливаемая сдвигом фаз напряжений, присущих схеме двух ваттметров, отсутствует. При симметричной и равномерной нагрузке показания всех ваттметров для любых значений $\cos \varphi$ одинаковы. При неравномерной нагрузке фаз схема дает возможность определить $\cos \varphi$ отдельно для каждой фазы.

В то же время необходимо учитывать недостатки схемы трех ваттметров: третий ваттметр вносит в изме-

¹ Класс точности прибора численно определяется допустимой погрешностью, выраженной в процентах от конечного (номинального) значения рабочей части шкалы прибора.

рение свою погрешность; усложняется одновременный отсчет показаний; необходимо иметь большее количество приборов и измерительных трансформаторов. При измерениях в установках с низким $\cos \varphi$ необходимо применение специальных «малокосинусных» ваттметров.

Полная схема измерения мощности тремя ваттметрами приведена на рис. 13. Так как цепи напряжения ватт-

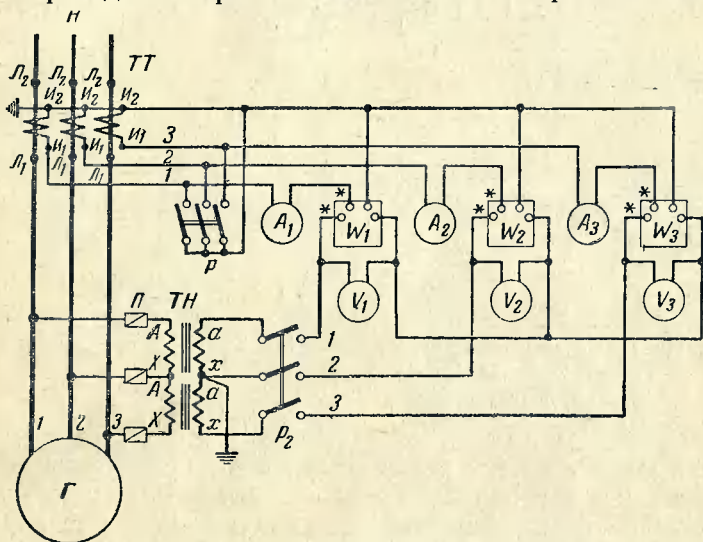


Рис. 13. Схема трех ваттметров для измерения мощности генераторов высокого напряжения.

Г—испытываемый генератор; ТТ—трансформаторы тока; ТН—трансформаторы напряжения; П—предохранители; Р—рубильник для закорачивания токовых цепей приборов; Р₂—рубильник для отключения цепей напряжения приборов.

метров соединены в звезду, т. е. получают фазные напряжения трансформаторов напряжения ($100 : \sqrt{3}$), предел ваттметра, например, типа Д 529/4 по напряжению должен быть взят 75 в.

Мощность, измеренная по схеме рис. 13, равна

$$P = K(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3),$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — показания ваттметров.

Действительное значение измеряемой мощности с учетом погрешностей приборов и измерительных трансформаторов может быть определено по выражению

$$P_d = K \left[(\alpha_1 + \theta_1) \left(1 - \frac{f'_{ТГ} + f'_{ТН} + f'_\delta}{100} \right) + \right. \\ \left. + (\alpha_2 + \theta_2) \left(1 - \frac{f''_{ТГ} + f''_{ТН} + f''_\delta}{100} \right) + \right. \\ \left. + (\alpha_3 + \theta_3) \left(1 - \frac{f'''_{ТГ} + f'''_{ТН} + f'''_\delta}{100} \right) \right], \quad (32)$$

где для каждой фазы

$$f_\delta = 0,0291 (\delta_T - \delta_H) \operatorname{tg} \varphi. \quad (33)$$

Значение $\cos \varphi$ каждой фазы определяется по показаниям ваттметра, амперметра и вольтметра. Например, для фазы I

$$\cos \varphi_1 = \frac{K \alpha_1}{I_1 U_1},$$

где $K \alpha_1$ — мощность фазы I , *квт*;

I_1 — ток фазы I , *а*;

U_1 — напряжение фазы I , *кв*.

Сравнительный анализ схемы двух ваттметров и схемы трех ваттметров показывает, что при равных условиях практически обе схемы по точности измерения равноценны и выбор той или иной схемы может определяться лишь удобством измерений и наличием приборов.

Пример 4. Требуется измерить с возможно большей точностью мощность турбогенератора типа ТВ2-100-2, 117 500 *кв*а, 13 800 *в*, $\cos \varphi = 0,85$.

В связи с отсутствием лабораторных трансформаторов тока высокого напряжения $\frac{5000}{5}$ *а* было решено использовать незагруженные сердечники имеющихся в установке двухкernовых трансформаторов тока типа ТПШФА $\frac{5000}{5}$ *а* класса 0,5/0,5 при мощности 30 *ва*. Эти kernы предварительно были проверены на месте установки при помощи аппарата для поверки измерительных трансформаторов типа АИТ. В качестве образцового использовался проверенный kern трансформатора тока $\frac{5000}{5}$ *а* класса 0,5, погрешности которого по току и по углу были известны. Проверка для каждой фазы производилась в режиме короткого замыкания генератора при токах, близких к номинальному.

Для измерения напряжения были установлены образцовые трансформаторы напряжения типа И-50 класса $0,2 \frac{15\,000}{100}$ в.

Была применена схема трех ваттметров. Ваттметры взяты типа ЭДВ/2 класса 0,2 с пределами 5 а, 75 в, шкала 300 мм но-ниусная, 75 делений (дающая возможность непосредственного отсчета до 0,1 деления).

$$\text{Вычисляем } K = \frac{5\,000}{5} \cdot \frac{15\,000}{100} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 750 \text{ квт/}^\circ.$$

Погрешности измерительных трансформаторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

	Погрешность по току и напряжению, % соответственно	Угловая погрешность, мин
Трансформатор тока, фаза 1	+0,20	+10
То же, фаза 2	+0,10	+15
„ „ фаза 3	-0,10	+5
Трансформатор напряжения, фаза 1	+0,05	+15
То же, фаза 2	+0,1	+10
„ „ фаза 3	+0,15	+5

Результирующие погрешности измерительных трансформаторов по фазам определяются исходя из значения $\cos \varphi$ нагрузки, равного 0,85 (определено по щитовым приборам), чему соответствует $\operatorname{tg} \varphi = 0,62$. При этих условиях по формуле (33) определены:

$$f'_8 = 0,0291 (10' - 15') 0,62 = -0,09\%,$$

$$f''_8 = 0,0291 (15' - 10') 0,62 = +0,09\%,$$

$$f'''_8 = 0,0291 (5' - 5') 0,62 = 0.$$

При измерении мощности по команде были одновременно сняты показания всех ваттметров $\alpha_1 = 42,3^\circ$, $\alpha_2 = 42,4^\circ$, $\alpha_3 = 42,1^\circ$.

Поправки к показаниям ваттметров на отметке 40° согласно протоколам поверки равны $\theta_1 = -0,05^\circ$ (половине но-ниусного деления), $\theta_2 = -0,05^\circ$ и $\theta_3 = +0,05^\circ$.

Измеряемая мощность с учетом поправки на измерительные трансформаторы и ваттметры определяется по формуле (32) и равна

$$P = 750 \left[(42,3 - 0,05) \left(1 - \frac{0,2 + 0,05 - 0,09}{100} \right) + (42,4 - 0,05) \times \right. \\ \times \left(1 - \frac{0,1 + 0,1 + 0,09}{100} \right) + (42,1 + 0,05) \times \\ \left. \times \left(1 - \frac{-0,1 + 0,15}{100} \right) \right] = 94\,875 \text{ квт.}$$

Схема двух ваттметров для генераторов низкого напряжения показана на рис. 14. Ее особенностью является включение цепей напряжения ваттметров без трансформаторов напряжения¹. Предел ваттметров по напряжению выбирается в зависимости от величины линейного напряжения, но не выше 600 в. При этих изме-

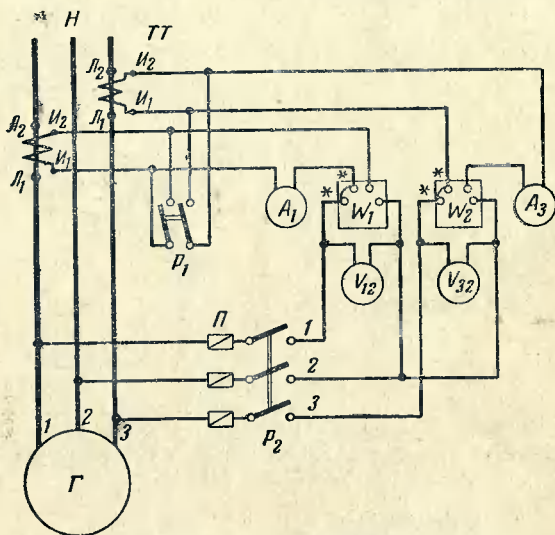


Рис. 14. Схема двух ваттметров для измерения мощности генераторов низкого напряжения.

рениях могут быть применены ваттметры типа Д 529/4 или Д 539/4, имеющие пределы по напряжению 75—150—300—600 в.

В цепи напряжения рекомендуется установить предохранители или автоматы. В последнем случае рубильник P_2 необязателен. Для уменьшения разности потенциалов между токовой катушкой ваттметра и подвижной рамкой необходимо одноименные генераторные зажимы ваттметров соединить перемычками. Вторичные обмотки трансформаторов тока при этом нельзя заземлять.

¹ Такая схема иногда называется схемой полукосвенного измерения мощности.

Измеряемая мощность равна

$$P = K(\alpha_1 + \alpha_2), \quad (34)$$

где $K = C_{вт} K_{тт} \cdot 10^{-3}$ [квт/1°].

Пример 5. Измеряется мощность генератора типа Т2-0,5-2 625 ква, 525 в, $\cos \varphi = 0,8$. Установлены трансформаторы тока $\frac{750}{5} a$. Нулевой провод отсутствует.

Применяются ваттметры типа Д 529/4 класса 0,5 с пределами измерения 5 а, 600 в, шкала 75 делений.

Определяем постоянную ваттметра $C_{вт} = \frac{5 \cdot 600}{75} = 40$ вт/1°.

Определяем коэффициент ваттметра $K = 40 \frac{750}{5} 10^{-3} = 6$ квт/1°.

При измерении мощности отсчитаны показания ваттметров

$$\alpha_1 = 7,2^\circ \text{ и } \alpha_2 = 55^\circ.$$

Следовательно, по формуле (34) мощность равна

$$P = 6(7,2 + 55) = 375 \text{ квт.}$$

Так как $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{7,2}{55} = 0,13$, то $\cos \varphi = 0,6$. Он определен по кривой рис. 5 (см. пример 1).

3. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При измерении мощности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором необходимо иметь в виду большой пусковой ток, в несколько раз превосходящий номинальный. Поэтому в схеме измерения обязательно должны быть предусмотрены рубильники, закорачивающие на время пуска токовые цепи ваттметров и амперметров.

Особенностью измерения мощности двигателей является практически равномерная нагрузка по фазам и обычно меньшие требования к точности измерения мощности.

Наиболее часто измерение мощности двигателей производится с целью определения фактической нагрузки и соответствия его мощности приводимого механизма, а также при тепловых испытаниях. При определении

к. п. д. двигателей, особенно двигателей большой мощности, требования к точности измерения повышаются.

Схема двух ваттметров, описанная применительно к измерению мощности генератора и изображенная на рис. 12, применяется при испытании двигателей высокого напряжения большой мощности. Генераторные зажимы ваттметров должны быть включены со стороны

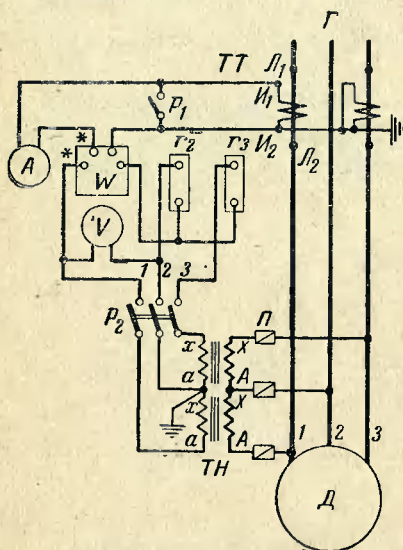


Рис. 15. Включение ваттметра с искусственной нулевой точкой для измерения мощности двигателей высокого напряжения. Необходимо, чтобы

$$r_{\text{вт}} = r_2 = r_3.$$

Ваттметры берутся класса 0,5 с пределами измерения 5 а, 100 в (например, типа Д 539. Поправки на приборы не вводятся.

На время пуска двигателя необходимо рубильником P_1 закорачивать токовые цепи приборов.

При измерении мощности двигателей низкого напряжения применяется схема двух ваттметров без трансформаторов напряжения, приведенная на рис. 14 применительно к измерению мощности генератора. При измерении мощности двигателя на схеме испытуемый двигатель должен находиться со стороны нагрузки.

быть включены со стороны питания (со стороны генератора). Следовательно, на схеме рис. 12 испытуемый двигатель должен находиться со стороны нагрузки. При измерении мощности двигателя место присоединения трансформаторов напряжения (со стороны нагрузки или со стороны питания) не имеет значения, так как приведенное сопротивление токовых цепей пренебрежительно мало по сравнению с сопротивлением двигателя. Трансформаторы тока и трансформаторы напряжения, как правило используются, имеющиеся в установке.

Ваттметры должны выбираться класса точности 0,5—1,0 с пределами измерения по току 5 а и по напряжению соответственно номинальному (линейному) напряжению сети.

При сборке схемы и выполнении измерений необходимо соблюдать правила техники безопасности и не забывать (особенно при пользовании переключателем полярности ваттметра), что на зажимах цепи напряжения ваттметров напряжение 220—380 в. Если линейное напряжение двигателя превосходит 380 в, то рекомендуется применять трансформаторы напряжения (например, 500/100 в) и пользоваться схемой рис. 12.

Схема одного ваттметра с искусственной нулевой точкой. Так как нагрузка двигателя по фазам равномерна и симметрична, то возможно измерение мощности одной фазы с умножением результата измерения на три.

Схема измерения применительно к двигателю высокого напряжения изображена на рис. 15. Нулевая точка образована цепью напряжения ваттметра и двумя равными ей по сопротивлению магазинами сопротивлений r_2 и r_3 . Ваттметр выбирается с пределами 5 а по току и 75 в по напряжению, исходя из фазного напряжения трансформатора напряжения $100 : \sqrt{3}$, например типа Д 529/4.

Необходимо убедиться в том, что к ваттметру подводится напряжение и ток одной и той же фазы. Вольтметр включается на линейное напряжение с тем, чтобы не исказить звезду фазных напряжений.

Если в установке имеется трехфазный трансформатор напряжения, то может быть применена схема с одним

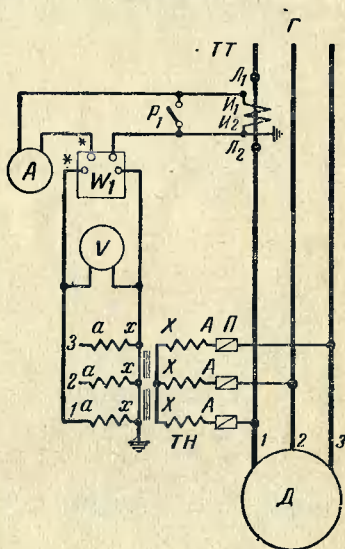


Рис. 16. Включение одного ваттметра на фазное напряжение для измерений мощности двигателей высокого напряжения.

ваттметром, изображенная на рис. 16, где цепь напряжения ваттметра включена непосредственно на фазное напряжение. В этой схеме вольтметр должен быть включен на фазное напряжение.

Измеряемая мощность в обоих случаях не зависит от порядка чередования фаз и равна

$$P = 3K\alpha, \quad (35)$$

где α — отсчет по ваттметру в делениях,

$$K = C_{\text{вт}} k_{\text{тт}} k_{\text{тн}} \cdot 10^{-3} \text{ [квт/1}^\circ\text{]}. \quad (36)$$

Для определения $\cos \varphi$ пользуются формулой

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}IU},$$

где I и U — измеренные ток, a и напряжение, $кв$.

Пример 6. Требуется измерить мощность асинхронного двигателя, имеющего табличные данные: 310 *квт*, 3 000 *в*, 72,5 *а*, $\cos \varphi = 0,89$, 740 *об/мин*. Измерительные трансформаторы $\frac{100}{5} a$ и $\frac{3\,000}{100} в$.

Применим схему одного ваттметра с искусственной нулевой точкой. Ваттметр берем типа Д 529/4 класса 0,5 с пределами 5 *а*, 75 *в*, шкала 75 делений. Номинальный ток цепи напряжения ваттметра 3 *ма*, и следовательно, сопротивление цепи напряжения на пределе 75 *в* равно

$$r = \frac{75}{0,003} = 25\,000 \text{ ом.}$$

В качестве сопротивлений r_2 и r_3 искусственной звезды берем магазины сопротивления класса 0,1, например типа Р-14, общим сопротивлением 100 000 *ом*, на которых штепселем устанавливаем сопротивление по 25 000 *ом*. Эти магазины допускают ток 3 *ма*.

При полностью нагруженном двигателе измерено $I = 72,5 a$, $U = 3\,000 в$ и отсчет по ваттметру $\alpha = 37,5^\circ$. Так как постоянная ваттметра равна $C_{\text{вт}} = \frac{5 \cdot 75}{75} = 5 \text{ вт/1}^\circ$, то

$$K = C_{\text{вт}} \cdot K_{\text{тт}} \cdot K_{\text{тн}} = 5 \frac{100}{5} \cdot \frac{3\,000}{100} \cdot 10^{-3} = 3 \text{ квт/1}^\circ.$$

Тогда

$$P = 3 \cdot 3 \cdot 37,5 = 336 \text{ квт и}$$

$$\cos \varphi = \frac{336}{\sqrt{3} \cdot 72,5 \cdot 3,0} = 0,89.$$

Попутно напомним, что на табличке двигателя указывается полезная мощность двигателя (т. е. мощность на валу), а мощность, измеренная ваттметром, является мощностью, потребляемой двигателем из сети. Так как в нашем опыте ток, напряжение и $\cos \varphi$ двигателя соответствуют его табличным данным, то можно определить к. п. д. у двигателя

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P} \cdot 100\% = \frac{310}{336} \cdot 100\% = 92,5 \%$$

Раньше имели распространение лабораторные ваттметры Сименса и Гальске с пределами измерения 5 а, 90 в с зажимом 1 000 ом. К ваттметрам прилагалось трехфазное добавочное сопротивление, образующее искусственную нулевую точку для измерения мощности трехфазных трехпроводных установок при полной симметрии. К сожалению, наша промышленность таких добавочных сопротивлений в настоящее время не выпускает.

Схема измерения мощности одним ваттметром для низковольтного двигателя, имеющего доступную нулевую точку обмотки статора, приведена на рис. 17. Мощность определяется по формуле (35), причем при определении K по формуле (36) $k_{\text{ТН}} = 1$.

Комплектное устройство (переносный измерительный комплект) типа К50. Для измерения мощности двигателей низкого напряжения отечественной промышленностью выпускается комплектное устройство в виде чемодана, включающего в себя измерительные приборы, трансформаторы тока, коммутирующую аппаратуру и внешние зажимы для включения комплектного устройства в схему измерений. Комплектное устройство собрано по схеме измерения мощности при помощи одного ваттметра, переключаемого специальным переключателем поочередно с одной фазы на другую. Это обуславливает вынужденный порядок последовательного (а не одновременного) измерения мощности P_1 , P_2 и P_3 , что при ко-

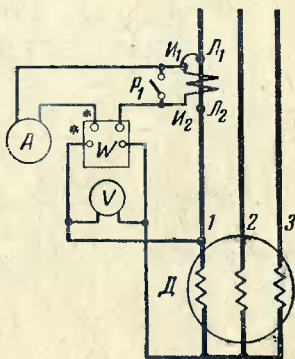


Рис. 17. Включение одного ваттметра на фазное напряжение для измерения мощности двигателей низкого напряжения.

леблющейся нагрузке может снизить точность измерения.

Пределы измерения К50 по току 1—50 а* и по напряжению 150—600 в, что соответствует измеряемой мощности трехфазных установок 0,45—90 квт.

Применение комплектных измерительных устройств чрезвычайно упрощает измерение мощности и исключает

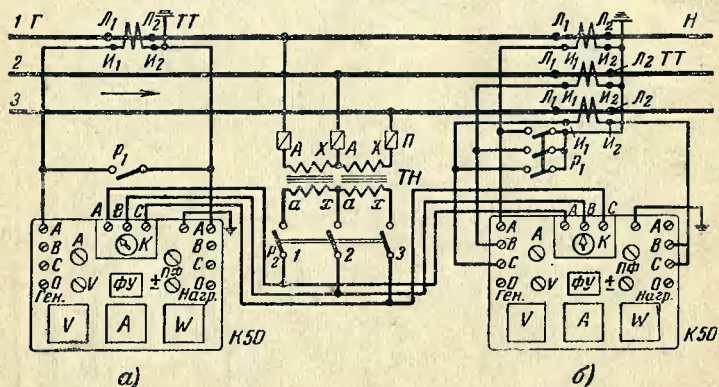


Рис. 18. Включение комплектного устройства типа К50 при измерении мощности двигателя высокого напряжения.

а — с одним трансформатором тока; б — с тремя трансформаторами тока.

ошибки при сборке схемы. В ближайшем будущем будут выпущены измерительные чемоданы типа К51 с трехфазным ваттметром по схеме двух ваттметров класса 0,5 и они получат самое широкое распространение при измерении установок высокого напряжения.

На рис. 18 дана схема включения комплектного устройства типа К50 при измерении мощности двигателя высокого напряжения.

При измерении с одним трансформатором тока (рис. 18,а) пределы измерения 5 а и 150 в. Переключатель фаз устанавливается в положение, соответствующее фазе, в которую включен трансформатор тока. Стрелка колодки К должна быть направлена к соответствующим зажимам напряжения. Мощность определяется по формуле

$$P = 3k_{\text{ТТ}} k_{\text{ТН}} P_A \text{ [квт]},$$

* При помощи трансформаторов тока И508, входящих в комплект, пределы измерения расширяются до 600 а и 1 080 квт.

где $k_{\text{ТТ}}$ и $k_{\text{ТН}}$ — коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов;

P_A — измеренная мощность фазы A .

При измерении с тремя трансформаторами тока переключатель ПФ и колодка К последовательно переводятся в положения A, B, C . Мощность

$$P = k_{\text{ТТ}} k_{\text{ТН}} (P_A + P_B + P_C) \text{ [квт].}$$

Схема одного ваттметра, включенного на разность токов. Схема одного ваттметра, включенного на разность токов двух фаз и на одно линейное напряжение, изображена на рис. 19. Там же дана векторная диаграмма схемы, откуда видно, что ток в обмотке ваттметра равен $\sqrt{3}I$ и поэтому трехфазная мощность при симметричной и равномерной нагрузке фаз и принятом чередовании фаз 1—2—3 непосредственно измеряется одним ваттметром.

Для ваттметра предел измерения по току должен быть 10 а, по напряжению — соответственно линейному напряжению, а для трансформаторов напряжения — 100 в.

Измеренная мощность определяется непосредственно по ваттметру $P = K\alpha$, где K определяется по формуле (36).

Схему рекомендуется применять в тех случаях, когда имеется один однофазный трансформатор напряжения и два трансформатора тока.

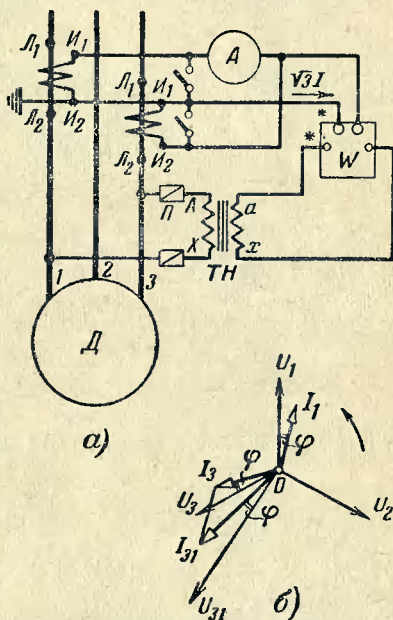


Рис. 19. Измерение мощности одним ваттметром, включенным на разность токов. Предел измерения по току ваттметра должен быть взят в $\sqrt{3}$ раз больше номинального вторичного тока трансформаторов тока.

а — схема включения; б — векторная диаграмма.

Пример 7. Требуется определить нагрузку высоковольтного двигателя, в пусковом шкафу которого установлены два трансформатора тока и один трансформатор напряжения, включенный на линейное напряжение. Мощность двигателя 290 *квт*, напряжение 6 000 *в*.

Трансформаторы тока $\frac{50}{5}$ *а* установлены в фазе 1 и в фазе 3; трансформатор напряжения $\frac{6\,000}{100}$ *в* присоединен между фазами 1 и 3. Чередувание фаз 1—2—3. Такое включение измерительных трансформаторов соответствует схеме рис. 19. Примем схему одного ваттметра, включенного на разность токов, как указано на той же схеме. Используем имеющийся ваттметр типа Д 539/1 класса 0,5 с пределами измерения 10 *а*, 150 *в*, шкала 75 делений.

При измерении показания ваттметра $\alpha = 26^\circ$. Так как

$$C_{\text{вт}} = \frac{10 \cdot 150}{75} = 20 \text{ вт/1}^\circ \text{ и } K = 20 \cdot \frac{50}{5} \cdot \frac{6\,000}{100} \cdot 10^{-3} = 12,0 \text{ квт/1}^\circ,$$

то

$$P = 12,0 \cdot 26 = 312 \text{ квт.}$$

Заметим, что лучше было бы применить ваттметр с номинальным напряжением не 150, а 100 *в*, так как измерение мощности в первой трети шкалы ваттметра дает повышенную погрешность. Так, если бы мы располагали ваттметром с пределами измерения 10 *а*, 100 *в*, шкала 100 делений, для которого

$$C'_{\text{вт}} = \frac{10 \cdot 100}{100} = 1 \text{ вт/1}^\circ \text{ и } K' = 10 \cdot \frac{50}{5} \cdot \frac{6\,000}{100} \cdot 10^{-3} = 6 \text{ квт/1}^\circ,$$

то при той же мощности отсчет по ваттметру составил бы

$$\alpha = \frac{P}{K'} = \frac{312}{6} = 52^\circ,$$

т. е. производился во второй половине шкалы.

Измерение мощности и определение $\cos \varphi$ при помощи счетчиков. Мощность, потребляемая двигателем, может быть определена по трехфазному счетчику, учитывающему расход активной энергии. Для этого необходимо отсчитать число оборотов N диска за некоторый промежуток времени t (достаточно 20—40 *сек*, отсчитываемых по секундомеру). Нагрузка двигателя за этот промежуток времени не должна изменяться.

Если на табличке универсального счетчика активной энергии, например типа САЗУ, указано 1 *квт* · *ч* = n обо-

ротов диска¹, то мощность в киловаттах определяется по выражению

$$P = \frac{3600}{n} \frac{N}{t} k_{\text{ТТ}} k_{\text{ТН}},$$

где $k_{\text{ТТ}}$ и $k_{\text{ТН}}$ — коэффициенты трансформации трансформаторов тока и трансформаторов напряжения.

Пример 8. На табличке счетчика указано: 1 квт·ч = 2 500 оборотов, 5 а, 100 в. Счетчик включен с трансформаторами тока $\frac{400}{5}$ а и трансформаторами напряжения $\frac{3000}{100}$ в. При определении мощности диск совершил 20 оборотов за 56 сек.

В этом случае измеренная мощность равна

$$P = \frac{3600}{2500} \cdot \frac{20}{56} \cdot \frac{400}{5} \cdot \frac{3000}{100} = 1240 \text{ квт.}$$

Для определения $\cos \varphi$ по трехфазному счетчику необходимо кратковременно, секунд на 30—60, сначала отключить цепь напряжения счетчика фазы 1 (например, вынуть предохранитель) и отсчитать за это время число оборотов диска. Затем включить цепь напряжения фазы 1, отключить цепь напряжения фазы 3 и отсчитать число оборотов диска за тот же промежуток времени, после чего схема восстанавливается.

Если обозначить через N_2 большее отсчитанное число оборотов диска, а через N_1 меньшее, то $\cos \varphi$ определяется по кривой рис. 5 по отношению $\frac{N_1}{N_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$.

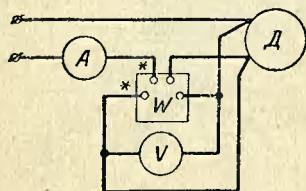
Если установлены два однофазных счетчика, то для определения $\cos \varphi$ не требуется отключать цепи напряжения. В этом случае сначала отсчитываются обороты диска одного счетчика, а затем за такой же промежуток времени — обороты диска другого счетчика. Лучше отсчет оборотов делать вдвоем одновременно. При измерениях нагрузка не должна изменяться.

Измерение мощности двигателей малой мощности требует учета потребления мощности цепями измери-

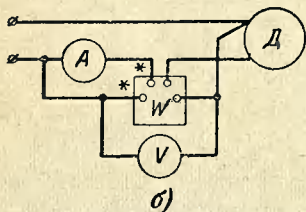
¹ Согласно ГОСТ указывается передаточное число счетчика.

тельных приборов, в частности цепями напряжения, так как потребление приборов может быть соизмеримо с мощностью самого двигателя и существенно повлиять на точность измерений.

Обычно погрешность в измерении мощности малых двигателей сводят к приемлемому минимуму путем соответствующего включения цепей напряжения ваттметра или же подбором специальных приборов с уменьшенным потреблением мощности.



а)



б)

Рис. 20. Измерение мощности маломощных двигателей.

а — ток, потребляемый цепями напряжения ваттметра и вольтметра на много меньше тока нагрузки двигателя; б — ток, потребляемый цепями напряжения ваттметра и вольтметра, соизмерим с током нагрузки двигателя.

Пример 9. На рис. 20,а изображена принципиальная схема измерения мощности однофазного асинхронного двигателя 50 вт, 220 в, 0,35 а. Цепи напряжения ваттметров и вольтметров присоединены непосредственно к зажимам двигателя. Применен ваттметр типа Д 527/2 класса 0,5 с пределами 0,5—1 а (0,6—0,15 ом) и 150—300 в (5 000—10 000 ом), вольтметр типа АСТВ 150—300 в (5 000—10 000 ом) и амперметр типа АСТ-3 0,5—1 а (4,44—11,1 ом).

Для предела измерения 300 в ток, потребляемый цепями напряжения ваттметра и вольтметра, равен

$$I_{\text{пр}} = \frac{220 \cdot 2}{10\,000} = 0,044 \text{ а.}$$

Этот ток равный примерно 10% тока нагрузки двигателя, протекает вместе с ним по последовательной обмотке ваттметра, вследствие чего измеренная мощность может оказаться больше действительной на ~ 10%. Погрешность будет тем больше, чем меньше мощность измеряемого двигателя.

Чтобы уменьшить погрешность, необходимо цепи напряжения ваттметра и вольтметра переключить к генераторному зажиму токовой обмотки ваттметра, как это указано на рис. 20,б. В этом случае через токовую обмотку ваттметра протекает только ток нагрузки двигателя. Однако напряжение, измеряемое вольтметром и подводимое к цепи напряжения ваттметра, будет больше напряжения на зажимах двигателя за счет падения напряжения в последовательной цепи ваттметра и амперметра, а это создаст также некоторую погрешность в из-

мерении мощности. Но этой погрешностью можно пренебречь, так как сопротивление токовой цепи приборов для предела 0,5 а составляет $0,6 + 4,44 = 5$ ом, а полное сопротивление двигателя значительно больше, около $\frac{220}{0,35} = 660$ ом, вследствие чего падение напряжения в последовательной цепи приборов мало.

Таким образом, применяя приборы, потребление цепей напряжения которых соизмеримо с током нагрузки двигателя, необходимо собирать схему измерений, приведенную на рис. 20,б.

Можно, однако, применить схему измерения мощности по рис. 20,а, если подобрать приборы с малым потреблением цепи напряжения, например ваттметр типа Д 529/2 класса 0,5 с пределами 0,25—0,5 а (0,2 ом), 75—150—300—600 в (3 ма) и вольтметр типа Д 523/3 с пределами 75—150—300—600 в (25 000—50 000—100 000—20 000 ом). Тогда ток, потребляемый цепями напряжения, составит

$$I_{\text{пр}} = 0,003 \frac{220}{300} + \frac{220}{100\,000} = 0,0044 \text{ а} = 4,4 \text{ ма},$$

что мало по сравнению с током нагрузки двигателя.

При измерении мощности трехфазных двигателей малой мощности рекомендуется собирать схему трех ваттметров, как схему симметричную и не нарушающую распределение токов по фазам двигателя.

Измерение мощности двигателя по амперметру. На щитке двигателя указывается полезная мощность двигателя (мощность на валу), номинальное напряжение и номинальный ток двигателя.

Мощность, потребляемая двигателем из сети, равна

$$P_{\text{сет}} = \sqrt{3} IU \cos \varphi 10^{-3} \text{ [квт]}.$$

Полезная мощность

$$P = \eta P_{\text{сет}},$$

где η — к. п. д. двигателя.

С изменением нагрузки на валу изменяется ток статора I и $\cos \varphi$. Ток статора является геометрической

суммой приведенного к напряжению статора тока ротора¹ и тока холостого хода. Значение тока холостого хода для различных типов двигателей колеблется в широких пределах (20—50% номинального), вследствие чего между нагрузкой на валу и током статора нет пропорциональности. Однако если определить ток холостого

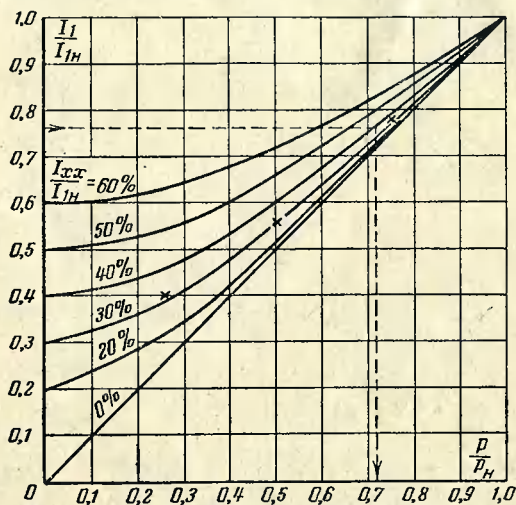


Рис. 21. Обобщенные кривые зависимости тока статора от нагрузки для разных значений тока холостого хода.

хода, то можно приблизительно определить нагрузку двигателя по току статора, пользуясь обобщенными кривыми, приведенными на рис. 21. Эти кривые построены для нескольких значений тока холостого хода и дают зависимость тока статора от нагрузки. По оси абсцисс отложена нагрузка в относительных единицах $\frac{P}{P_n}$, а по оси ординат — ток статора, также в относительных единицах $\frac{I_1}{I_{1n}}$ (см. также приложение II).

¹ Приведенным током ротора асинхронного двигателя называется ток ротора, уменьшенный во столько раз, во сколько напряжение статора больше произведения тока ротора на его полное сопротивление.

Пример 10. Определяется мощность двигателя дымососа с табличными данными $P = 310$ квт, 3000 в, 74,5 а, 740 об/мин.

Холостой ход двигателя определялся приближенно — без рассоединения муфты, при закрытых шиберах. При номинальном напряжении измерено $I_{x,x} = 25$ а. Тогда

$$\frac{I_{x,x}}{I_n} = \frac{25}{72,5} \cong 0,35.$$

Следовательно, на рис. 21 отсчет нужно делать примерно посередине между кривыми 30 и 40%.

При нагрузке измерен ток статора $I = 55$ а, следовательно,

$$\frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{55}{72,5} = 0,76. \text{ Эту величину нужно найти на вертикальной оси и}$$

провести через нее горизонтальную линию до пересечения с кривой, найденной ранее. (Горизонтальная линия на рис. 21 изображена пунктиром. Кривая не показана, так как она, как уже указывалось, лежит между кривыми 30 и 40%.) Затем следует опустить перпендикуляр на горизонтальную ось (показана пунктиром, заканчивающимся стрелочкой)

и определить таким образом $\frac{P}{P_n} = 0,73.$

Остается вычислить искомую мощность, которая приблизительно равна $P = 0,73 \cdot 310 = 226$ квт.

4. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

Трехфазные четырехпроводные сети низкого напряжения, как правило, имеют смешанную нагрузку. Они питают освещение и электродвигатели; нагрузка обычно неравномерна по фазам, нередко несимметрична по фазным напряжениям, особенно если в сети включены сварочные трансформаторы. В таких случаях для измерения может применяться только схема трех ваттметров, пригодная для любых неравномерных и несимметричных нагрузок трехфазных, как трехпроводных, так и четырехпроводных, сетей независимо от порядка чередования фаз.

Полная схема измерения для четырехпроводной сети напряжением 380 в и ниже приведена на рис. 22.

Ваттметры выбираются по пределу измерения цепи напряжения исходя из величины номинального фазного напряжения сети.

Генераторные зажимы первичной и вторичной обмоток каждого трансформатора тока (J_1 и I_1) должны

быть соединены перемычками. Перемычками соединяются также генераторные зажимы токовой цепи и цепи напряжения ваттметров с целью снижения потенциала между токовыми катушками и рамкой цепи напряжения ваттметров. Через эти же перемычки подается напряже-

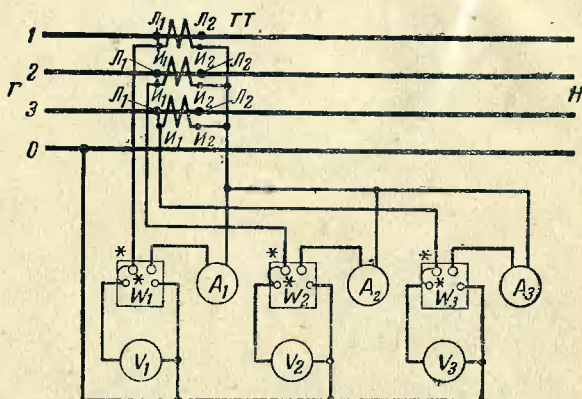


Рис. 22. Измерение мощности в трехфазной четырехпроводной сети.

ние на цепи напряжения ваттметров. Заземлять цепи вторичных обмоток трансформаторов тока нельзя.

При линейном напряжении выше 380 в рекомендуется для безопасности применять трансформаторы напряжения, номинальное первичное напряжение которых должно быть равно номинальному фазному напряжению сети.

Отсчет по трем ваттметрам берется одновременно, и мощность определяется по формуле

$$P = K (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3),$$

где

$$K = C_{вт} k_{тт} \cdot 10^{-3} [\text{квт}/1^\circ].$$

Пример 11. Необходимо измерить мощность отходящей трехфазной четырехпроводной линии с неравномерной нагрузкой фаз. Номинальное напряжение линии 380/220 в, в каждой фазе установлены

трансформаторы тока $\frac{100}{5}$ а.

Применим схему измерения мощности тремя ваттметрами, цепи напряжений которых включаются на фазные напряжения (рис. 22). Ваттметры типа Д 539/4, с пределами 5 а, 300 в, шкала 75 делений. Вычисляем

$$C_{\text{вт}} = \frac{5 \cdot 300}{75} = 20 \text{ вт/1}^\circ$$

и

$$K = 20 \cdot \frac{100}{5} \cdot 10^{-3} = 0,4 \text{ квт/1}^\circ.$$

При измерении мощности по команде сняты показания всех ваттметров $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 37^\circ$, $\alpha_3 = 52^\circ$. Тогда $P = 0,4 (45 + 37 + 52) = 53,6 \text{ квт}$.

5. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ОПЫТАХ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Асинхронные двигатели. При испытании крупных асинхронных двигателей питание их при опыте короткого замыкания желательно производить от выделенного генератора, используя резервную систему шин. Ротор двигателя должен быть заторможен. Напряжение от выделенного генератора поднимается плавно с нуля и доводится до значения, при котором ток статора двигателя равен номинальному. При заторможенном роторе из-за отсутствия вентиляции при токе в статоре, близком к номинальному, возможны перегрев обмотки статора и изменения температуры меди. Поэтому опыт короткого замыкания должен производиться быстро и четко.

Специфическим при измерении мощности короткого замыкания являются: низкий $\cos \varphi$ (0,2—0,3), необходимость подбирать пределы измерения приборов (особенно цепей напряжения), а также необходимость считаться с сопротивлением цепей приборов и сопротивлением ошиновки и кабелей между точками присоединения трансформаторов напряжения и зажимами двигателя.

Измерение производится обычно с использованием установленных трансформаторов тока, что и определяет верхнее значение тока при опыте короткого замыкания величиной номинального тока трансформатора тока или двигателя. Этим же определяется номинальный ток ваттметра и амперметра, равный вторичному току трансформатора тока, т. е. 5 а.

Напряжение короткого замыкания асинхронного двигателя, соответствующее номинальному току, в среднем

около 20% номинального напряжения двигателя определяет пределы измерения по напряжению ваттметров и вольтметров, а также применение трансформаторов напряжения или добавочных сопротивлений.

Пример 12. Испытывается двигатель с номинальным напряжением 6 кв. Ожидаемое напряжение при номинальном токе будет примерно $6\,000 \cdot 0,2 = 1\,200$ в. В этом случае для цепей напряжения надо установить лабораторные трансформаторы напряжения $\frac{1\,500}{100}$ в, присоединив их к зажимам статора двигателя и применить ваттметры с номинальным напряжением 100 в.

Однако при испытаниях всегда желательно использовать имеющиеся установленные трансформаторы напряжения, применив ваттметры и вольтметры на меньшие пределы по напряжению. Такое включение приборов возможно, если ваттметры и вольтметры имеют большое внутреннее сопротивление цепей напряжения.

Пример 13. Испытывается двигатель напряжением 6 кв. Ожидаемое вторичное напряжение установленного трансформатора напряжения при опыте короткого замыкания (при номинальном токе) примерно $0,2 \cdot 100 = 20$ в. Применим ваттметры типа Д 539/1 класса 0,5 с пределами 5 — 10 а и 30 — 75 — 150 — 300 в на пределе по напряжению 30 в ($r_{вт} = 10\,000$ ом) и вольтметры типа Д 523/2 класса 0,5 на пределе 30 в ($r_v = 6\,000$ ом).

Сопротивление нагрузки на каждый трансформатор напряжения составит

$$\frac{r_{вт} r_v}{r_{вт} + r_v} = \frac{10\,000 \cdot 6\,000}{10\,000 + 6\,000} = 3\,750 \text{ ом.}$$

Допустимое наименьшее сопротивление нагрузки на фазу трансформаторов напряжения класса 0,5 включенных в схему открытого треугольника равно

$$\sqrt{3} \frac{U_n^2}{P_n} = \frac{100^2}{50} \sqrt{3} \cong 350 \text{ ом.}$$

Как видно из прикидочного расчета при таком использовании приборов и трансформаторов напряжения перегрузки не будет, так как сопротивление нагрузки (3 750 ом) значительно больше минимально допустимого (350 ом).

Измерение мощности обычно производится по схеме двух ваттметров. Схема включения приборов показана на рис. 12 применительно к измерению мощности генератора. При сборке схемы по рис. 12 двигатель должен находиться со стороны нагрузки.

Необходимо обратить внимание на то, чтобы цепи напряжения измерительных приборов были присоединены со стороны зажимов испытуемого двигателя и чтобы в измеряемую цепь по возможности не входили коммутирующая аппаратура, ошиновка или силовые кабели. Лучше всего трансформаторы напряжения присоединить непосредственно к зажимам статора двигателя.

При подаче напряжения толчком во избежание повреждения приборов пусковым током необходимо при пуске токовые цепи приборов закорачивать.

При производстве измерений надо помнить, что при $\cos \varphi$ меньше 0,5 показания одного из ваттметров будут отрицательны. Следовательно, для выполнения отсчета переключатель полярности этого ваттметра придется перевести в положение обратной полярности, а при вычислении мощности его показания подставлять в формулу со знаком минус.

Опыт короткого замыкания можно провести при одном значении тока, подавая напряжение толчком от сети низкого напряжения. Так, например, при испытании двигателей 6 кВ может быть использована трехфазная сеть 380 или 500 В. В этом случае цепи напряжения ваттметров могут присоединяться непосредственно к зажимам двигателя без трансформаторов напряжения, но их пределы по напряжению должны соответствовать номинальному напряжению используемой сети.

Пределы ваттметров по току определяются ориентировочно путем приближенного пересчета, при котором уменьшение тока заторможенного двигателя принимается пропорциональным уменьшению напряжения питания.

Схема соединения приборов для этого случая показана на рис. 23.

При работе с этой схемой нельзя забывать о технике безопасности, особенно при переключениях переключателя полярности ваттметра, так как зажимы с напряжением 380 В расположены близко от его ручки.

При опыте короткого замыкания маломощных двигателей низкого напряжения применяется непосредственное включение приборов. Для получения симметричной схемы измерений рекомендуется использовать схему трех ваттметров, присоединяя параллельные цепи ваттметров к нулевой точке двигателя или соединяя их в искусственную звезду. Номинальные токи и напряже-

ния ваттметров выбираются в зависимости от мощности двигателя и напряжения короткого замыкания. Ваттметры желательно выбирать малокосинусные, например из серии Д-542.

Необходимо правильно присоединять цепи напряжения, исходя из соотношений внутренних сопротивлений ваттметров и вольтметров и сопротивления двигателя.

В качестве источника питания для двигателей низкого напряжения могут быть использованы три транс-

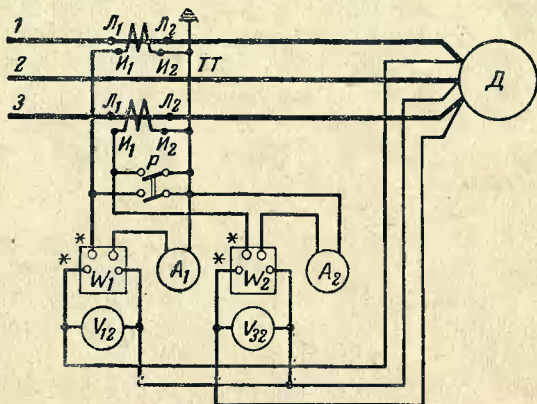


Рис. 23. Измерение мощности двигателя при опыте короткого замыкания.

форматора 220/12 в, 100—500 ва, включенные в треугольник или в звезду.

Трансформаторы. Измерение мощности короткого замыкания силовых трансформаторов производится по тем же схемам, что и для двигателей. Однако необходимо иметь в виду, что $\cos \phi$ для режима короткого замыкания еще ниже и лежит в пределах 0,1—0,2, вследствие чего обязательно применение малокосинусных ваттметров для схем одного и трех ваттметров. Так как напряжение короткого замыкания u_k [%] трансформаторов обычно известно, выбор приборов по пределам измерений затруднений не вызывает.

Пример 14. Необходимо измерить мощность короткого замыкания двухобмоточного трехфазного трансформатора типа ТМ-5600/10 мощностью 5 600 ква, напряжением 10,0/6,3 кв, $u_k = 5,5\%$.

Определим величину подводимого напряжения в режиме короткого замыкания (замыкание со стороны 10,0 кв) при номинальном токе:

$$U_k = \frac{U_{н\text{к}}}{100} = \frac{6\,300 \cdot 5,5}{100} \cong 350 \text{ в.}$$

Для опыта короткого замыкания используем трехфазную сеть 380 в и рассмотрим три варианта измерения.

1. Для измерения мощности применим схему двух ваттметров. Ваттметры берем обычные, например типа Д-539, с пределом измерения по току 5 а, шкала 75 делений. Предел измерения по напряжению выбираем 300 в с внешним добавочным сопротивлением для напряжения 375 в. Так как номинальный ток цепи напряжения выбранных ваттметров составляет 3 ма, то величина добавочного сопротивления равна

$$r_d = \frac{375 - 300}{0,003} = 25\,000 \text{ ом.}$$

В качестве добавочных сопротивлений могут быть использованы магазины сопротивлений класса 0,1 или 0,2, например типа Р-14.

Постоянная ваттметра с учетом добавочного сопротивления будет равна

$$C_{\text{вт}} = \frac{5 \cdot 375}{75} = 25 \text{ вт/1}^\circ.$$

Трансформаторы тока установлены $\frac{600}{5}$ а, следовательно,

$$K = 25 \cdot \frac{600}{5} \cdot 10^{-3} = 3 \text{ квт/1}^\circ.$$

При измерении отсчитаны показания $\alpha_1 = 29,5^\circ$ и $\alpha_2 = 42,5^\circ$ (у первого ваттметра переключатель полярности поставлен на отрицательную полярность).

Тогда мощность короткого замыкания

$$P_{\text{к.з}} = 3(42,5 - 29,5) = 39 \text{ квт.}$$

Отношение $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = -\frac{29,5}{42,5} = -0,7$. По кривой рис. 5 находим $\cos \varphi_{\text{к.з}} = 0,1$.

2. Применим схему одного ваттметра, при которой необходимо выбрать малокосинусный ваттметр, например типа Д 542/4, с пределами измерения по току 5 а и по напряжению 300 в, шкала 75 делений, так как цепь напряжения ваттметра включается на фазное напряжение $\frac{380}{\sqrt{3}} = 220$ в (см. пояснения к рис. 15).

Сопротивление лучей звезды должно равняться сопротивлению цепи напряжения ваттметра, которое составляет

$$r_{\text{вт}} = \frac{300}{0,005} = 60\,000 \text{ ом.}$$

так как номинальный ток цепи напряжения ваттметра типа Д 542 равен 0,005 а (5 ма).

Номинальный $\cos \varphi$ ваттметра равен 0,1 (см. приложение), а не единице. Поэтому постоянная ваттметра равна

$$C_{\text{вт}} = \frac{5 \cdot 300 \cdot 0,1}{75} = 2 \text{ вт/1}^\circ,$$

а

$$K = 3 \cdot 2 \cdot \frac{600}{5} \cdot 10^{-3} = 0,72 \text{ квт/1}^\circ.$$

Коэффициент 3 учитывает мощность трех фаз.

При измерении отсчитано показание $\alpha = 54^\circ$. Следовательно, $P_{\text{к.з}} = 0,72 \cdot 54 = 39 \text{ квт}$.

3. При измерении по схеме одного ваттметра применим обычный ваттметр с номинальным $\cos \varphi = 1$ и с теми же, как в предыдущем случае, пределами измерения по току и напряжению. Тогда

$$C_{\text{вт}} = \frac{5 \cdot 300}{75} = 20 \text{ вт/1}^\circ$$

и

$$K = 3 \cdot 20 \cdot \frac{600}{5} \cdot 10^{-3} = 7,2 \text{ квт/1}^\circ.$$

В этом случае ваттметр покажет $\alpha = 5,0^\circ$, т. е. отсчет придется производить в самом начале шкалы, где абсолютная погрешность ваттметра велика. Измеренная мощность равна

$$P_{\text{к.з}} = 7,2 \cdot 5 = 36 \text{ квт}$$

Сопоставляя результаты измерений по трем вариантам, можно сказать, что наиболее удобной схемой, не требующей специальных (малокосинусных) ваттметров и дающей надежные отсчеты показаний обоих ваттметров на середине шкалы или в ее правой части, является схема двух ваттметров — схема Арона.

При измерениях мощности короткого замыкания необходимо помнить, что при низких значениях $\cos \varphi$ резко возрастают угловые погрешности трансформаторов тока, вследствие чего при точных измерениях необходимо применять проверенные непосредственно перед измерением лабораторные (можно низковольтные) трансформаторы тока класса 0,1 или 0,2.

Измерение мощности производится по схеме двух ваттметров, изображенной на рис. 23. Если напряжение при опыте короткого замыкания превосходит 600 в, то

применяются трансформаторы напряжения, так же как при испытании двигателей.

При проведении опыта короткого замыкания с трансформаторами, имеющими обычное воздушно-масляное охлаждение, опасаться перегрева обмоток не приходится.

Для трансформаторов с форсированным охлаждением необходимость включения охлаждения определяется местными инструкциями.

Для трехобмоточных трансформаторов опыт короткого замыкания производится для разных комбинаций обмоток в соответствии с программой испытаний. При разных сочетаниях обмоток u_k [%] трехобмоточного трансформатора имеет разные значения, что необходимо иметь в виду при выборе предела измерения ваттметра.

При подаче напряжения толчком возможен бросок намагничивающего тока. Поэтому на время включения токовые цепи приборов обязательно должны закорачиваться рубильником.

6. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ОПЫТАХ ХОЛОСТОГО ХОДА

Особенностью измерения мощности холостого хода асинхронных двигателей и трансформаторов является необходимость считаться с тем, что $\cos \varphi$ при измерении очень низок, особенно для трансформаторов (0,05—0,15), а потребляемый ток холостого хода составляет несколько процентов тока нагрузки для трансформаторов и до 20—30% для асинхронных двигателей. Поэтому не рекомендуется использовать установленные трансформаторы тока, так как работать они будут в самых неблагоприятных условиях (малый ток нагрузки и большая доля намагничивающего тока, большой угловой сдвиг тока нагрузки), что может привести к недопустимо большой угловой погрешности. Покажем это на примере.

Пример 15. Пусть измерение мощности холостого хода производится для трансформатора, у которого $I_{x.x} \cong 0,1I_n$. Установлены трансформаторы тока класса 0,5, для которых согласно ГОСТ 7746-55 при $0,1I_n$ погрешность по коэффициенту трансформации $f_{ТТ} = \pm 1\%$ и угловая погрешность $\delta_{ТТ} = \pm 60'$.

Определим погрешность измерения, которая обусловлена только измерительными трансформаторами при измерении мощ-

ности одним ваттметром (нагрузка равномерная) Угловой погрешностью трансформатора напряжения пренебрегаем, а погрешность в коэффициенте трансформации принимаем $f_{ТН} = \pm 0,5\%$ согласно классу.

Полагая, что в худшем случае все погрешности одного знака, и учитывая, что $\cos \varphi = 0,1$ соответствует $\operatorname{tg} \varphi = 9,95$, получаем $f_d = 0,0291 \delta_{ТН} \operatorname{tg} \varphi = 0,0291 \cdot 60 \cdot 9,95 = 17,4\%$ и $f_{\text{общ}} = f_{ТТ} + f_{ТН} + f_d = 1 + 0,5 + 17,4 = 18,9\%$. Такая погрешность недопустимо велика.

Погрешность измерения возрастет, если будут применены обычные лабораторные ваттметры, рассчитанные на полное отклонение при $\cos \varphi = 1$.

Поскольку измеряемый ток составляет примерно 10 % номинального, естественно выбрать ваттметр с пределом измерения по току 0,5 а, например типа Д 572/2, у которого внутреннее сопротивление на этом пределе 0,6 ом. Это сопротивление токовой цепи ваттметра создаст дополнительную нагрузку во вторичной обмотке трансформатора тока $5^2 \cdot 0,6 = 15$ вА, необходимо проверить, не выводит ли эта дополнительная нагрузка трансформатор тока из класса 0,5. Проверка выполняется подсчетом (§ 2, пример 2).

Допустим, что при включении ваттметра нагрузка трансформатора тока не превосходит допустимую, и мы используем этот ваттметр. Однако отклонение его стрелки, несмотря на то, что по токовой цепи протекает номинальный ток и к цепи напряжения приложено номинальное напряжение, из-за низкого $\cos \varphi$ составит приблизительно 10 %. Для такого отклонения допустимая погрешность ваттметра класса 0,5 с общим числом делений 100 равна $F = 0,5 \cdot \frac{100}{10} = 5\%$.

Значит, полная погрешность измерения мощности холостого хода трансформатора с использованием имеющихся установленных трансформаторов тока класса 0,5 и обычных лабораторных ваттметров класса 0,5 при неблагоприятных условиях может доходить до $f_{\text{общ}} = 5 + 18,9 = 23,9\%$, что совершенно неприемлемо.

Как видно из примера, при измерении мощности холостого хода как трансформаторов, так и асинхронных двигателей установка специальных трансформаторов тока на меньший номинальный ток совершенно необходима. Целесообразно устанавливать лабораторные многопредельные трансформаторы тока класса 0,2 или 0,1, причем втулки их по изоляции должны соответствовать рабочему напряжению испытываемого трансформатора или двигателя и иметь протокол проверки изоляции. При измерении мощности по схеме одного ваттметра необходимо применять только малокосинусные ваттметры, например из серии Д 542.

Измерение мощности холостого хода двигателей высокого напряжения и трансформаторов обычно производится по схеме двух ваттметров, показанной на рис. 12, с применением обычных ваттметров. Испыту-

емый двигатель на схеме рис. 12 должен находиться со стороны нагрузки. Перед включением трансформатора или двигателя токовые цепи приборов обязательно должны быть закорочены во избежание повреждения приборов пусковыми токами.

Так как $\cos \varphi$ при измерении меньше 0,5, то показания одного из ваттметров будут отрицательны, что необходимо учитывать при определении мощности так же, как иллюстрировано примером 14 в § 5.

Пример 16. Измеряется мощность холостого хода двухобмоточного трехфазного трансформатора типа ТМ-5600/10, 10,0/6,3 кВ.

Определим ориентировочно ток холостого хода со стороны 6,3 кВ при номинальном подводимом напряжении, предполагая, что $I_{х.х} \cong 0,07 I_n$.

Номинальный ток трансформатора со стороны 6,3 кВ для случая $\cos \varphi = 1$ определится как $I_n = \frac{5600}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 515$ а и, следовательно, ток холостого хода ориентировочно ожидается:

$$I_{х.х} = 0,07 \cdot 515 = 36 \text{ а.}$$

Так как в установке трансформаторы тока имеют коэффициент трансформации $\frac{600}{6}$ а, то на время измерения мощности холостого хода дополнительно установим высоковольтные трансформаторы тока с меньшим коэффициентом трансформации, например $\frac{30}{5}$ а. Класс точности этих трансформаторов тока должен быть не ниже 0,5.

Установлены трансформаторы напряжения $\frac{6000}{100}$ в.

Применим обычные ваттметры с пределами 5 а, 100 в, шкала 100 делений. Тогда

$$C_{вт} = \frac{5 \cdot 100}{100} = 5 \text{ вт/1}^\circ \text{ и } K = 5 \cdot \frac{30}{5} \cdot \frac{6000}{100} \cdot 10^{-3} = 1,8 \text{ квт/1}^\circ.$$

При измерении мощности отсчеты по ваттметрам составили

$$\alpha_1 = -45,5^\circ \text{ и } \alpha_2 = +55,5^\circ.$$

Следовательно,

$$P_{х.х} = 1,8 (55,5 - 45,5) = 18 \text{ квт; } \cos \varphi_{х.х} = 0,05$$

определен по кривой рис. 5 для

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = -\frac{45,5}{55,5} = -0,82.$$

$$I_{х.х} = \frac{18}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 0,05} = 33 \text{ а} \left(\text{или } I_{х.х} [\%] \text{ равен } \frac{33}{515} \cdot 100\% \cong 6\% \right).$$

7. ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Измерение реактивной мощности в трехфазных установках производится обычными косинусными ваттметрами (градуированными при $\cos \varphi = 1$), включенными по специальным схемам (см. § 1).

Схема одного ваттметра применительно к трехфазной высоковольтной установке без нулевого провода для симметричной и равномерной нагрузки и известном порядке чередования фаз изображена на рис. 24 и 7.

Реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3} K \alpha,$$

$$\text{где } K = C_{\text{вт}} k_{\text{ТТ}} k_{\text{ТН}} \cdot 10^{-3} \text{ [квар/1}^\circ\text{]}.$$

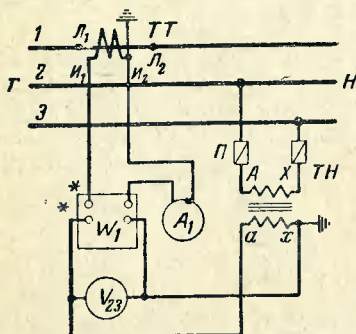


Рис. 24. Измерение реактивной мощности одним ваттметром.

Схема двух ваттметров (рис. 12, 14 и 23), применяемая для измерения активной мощности при равномерной и симметричной нагрузке фаз, пригодна, как указывалось в § 1, для измерения реактивной мощности. Если показания ваттметров α_1 и α_2 , то реактивная мощность равна

$$Q = \sqrt{3} K (\alpha_2 - \alpha_1),$$

где

$$K = C_{\text{вт}} k_{\text{ТТ}} k_{\text{ТН}} \cdot 10^{-3} \text{ [квар/1}^\circ\text{]}.$$

В частных случаях, если измерительные трансформаторы не применяются, то коэффициенты $k_{\text{ТТ}}$ и $k_{\text{ТН}}$ равны единице.

Схема двух ваттметров с перекрещенными напряжениями пригодна для трехфазных трехпроводных установок при симметрии фазных напряжений, для равномерной и неравномерной нагрузки фаз и при определенном порядке чередования фаз. Схема применительно

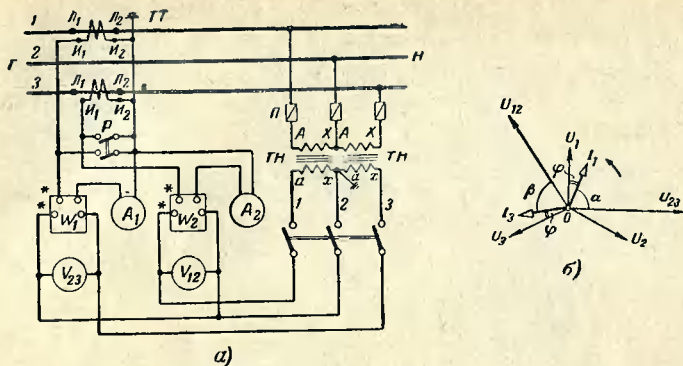


Рис. 25. Измерение реактивной мощности по схеме двух ваттметров с перекрещенными напряжениями.

а — схема соединения приборов; б — векторная диаграмма.

к установке высокого напряжения приведена на рис. 25. Там же показана ее векторная диаграмма, из которой следует, что ваттметры измеряют мощность

$$Q_1 = I_1 U_{23} \cos(90^\circ - \varphi) = I_1 U_{23} \sin \varphi,$$

$$Q_2 = I_3 U_{12} \cos(90^\circ - \varphi) = I_3 U_{12} \sin \varphi.$$

Общая измеряемая мощность равна

$$Q = \frac{\sqrt{3}}{2} K (\alpha_1 + \alpha_2),$$

где K определяется так же, как в предыдущих случаях (пример 1).

Схема двух ваттметров с искусственной нулевой точкой находит наибольшее применение при измерении реактивной мощности в трехфазных трехпроводных установках при равномерной и неравномерной нагрузке фаз, но при симметричной звезде фазных напряжений и определенном чередовании фаз; она дает возможность по показаниям ваттметров определять $\cos \varphi$.

Схема собирается из двух однотипных ваттметров и одного магазина сопротивления r , сопротивление которого равно сопротивлению цепи напряжения каждого

ваттметра. На рис. 26 схема дана применительно к установке высокого напряжения (см. также рис. 8).

Предел ваттметров по напряжению (обычно 75 в) выбирается по фазному напряжению трансформаторов напряжения.

Кривые зависимости показаний ваттметров от $\cos \varphi$, приведенные на рис. 9, дают возможность судить о коэффициенте мощности установки.

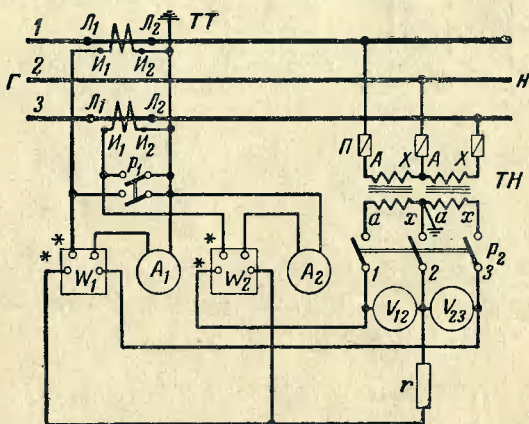


Рис. 26. Измерение реактивной мощности по схеме двух ваттметров с искусственной нулевой точкой.

r — магазин сопротивлений, по величине равный внутреннему сопротивлению цепи напряжения каждого ваттметра.

Пример 17. Измеряется реактивная мощность трехфазной линии 6,3 кВ, питающей предприятие. Установлены трансформаторы тока $\frac{15}{5}$ а и трансформаторы напряжения $\frac{6000}{100}$ в. Применим обычные

ваттметры активной мощности, которые включим по схеме двух ваттметров с искусственной нулевой точкой (рис. 26).

Возьмем ваттметры типа Д 539/1 класса 0,5 с пределами измерения по току 5 а и по напряжению 75 в (цепи напряжения ваттметров включены на фазное напряжение), шкала 75 делений, номинальный ток цепи напряжения ваттметра 0,003 а.

Тогда сопротивление r в схеме рис. 26 равно

$$r = \frac{75}{0,003} = 25\,000 \text{ ом.}$$

В качестве этого сопротивления используем магазин сопротивления класса 0,1 или 0,2.

$$\text{Постоянная ваттметра } C_{\text{вт}} = 5 \frac{75}{5} = 5 \text{ ватт/1}^\circ.$$

Здесь, несмотря на то, что взяты ваттметры активной мощности, постоянную этих ваттметров выражаем в вольт-амперах реактивных (*вар*) на одно деление шкалы, так как эти ваттметры включены в схему для измерения реактивной мощности.

Коэффициент, на который надо умножать показания ваттметров (учитывающий включение через измерительные трансформаторы), равен

$$K = 5 \cdot \frac{75}{5} \cdot \frac{6000}{100} \cdot 10^{-3} = 4,5 \text{ квар/1}^\circ.$$

При измерении сняты показания ваттметров

$$\alpha_1 = 47,5 \text{ и } \alpha_2 = 19,5.$$

Измеряемая реактивная мощность равна

$$Q = \sqrt{3} \cdot 4,5 (47,5 + 19,5) = 525 \text{ квар}.$$

Так как $\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{19,5}{47,5} = 0,41$, то по кривой рис. 9 определен $\cos \varphi = 0,6$.

Схема трех ваттметров дает правильное измерение реактивной мощности для трехфазных трехпроводных и четырехпроводных установок при равномерной и неравномерной нагрузке и при определенном порядке чередования фаз, но при симметрии фазных напряжений и получила широкое применение в сетях низкого напряжения.

Схема приведена на рис. 27 для полукосвенного измерения, т. е. для измерения без трансформаторов напряжения (рис. 11).

Надо иметь в виду, что разность потенциалов между токовыми катушками ваттметра и подвижной рамкой цепи напряжения равна линейному напряжению. Согласно ГОСТ 8476-60 на ваттметры допустимое напряжение между рамкой и токовой катушкой равно 600 в. Поэтому во избежание пробоя внутри ваттметра и короткого замыкания, при линейных напряжениях больших 380 в, желательно применять трансформаторы напряжения или схему, приведенную на рис. 28, описанную ниже, где цепи напряжения ваттметров включены на фазное напряжение.

Измеряемая реактивная мощность определяется по выражению

$$Q = \frac{K(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)}{\sqrt{3}},$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — показания ваттметров со своими знаками и

$$K = C_{\text{вт}} k_{\text{тт}} \cdot 10^{-3} [\text{квар}/1^\circ].$$

Схема трех ваттметров для четырехпроводных сетей. На рис. 28 приведен вариант схемы трех ваттметров с использованием фазного напряжения, пригодный толь-

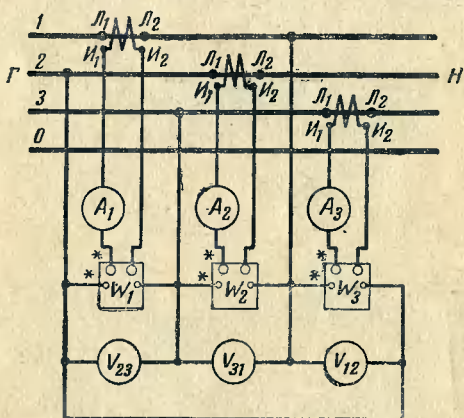


Рис. 27. Схема трех ваттметров для измерения реактивной мощности трехфазной четырехпроводной установки.

ко для четырехпроводных установок при равномерной и неравномерной нагрузке и симметричной звезде фазных напряжений. Особенностью этой схемы является необходимость одновременного измерения и активной мощности, так как измеренное значение активной мощности входит в подсчет реактивной мощности.

Измеряемая реактивная мощность при определенном порядке чередования фаз определяется по выражению

$$Q = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[K(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) - \frac{P_a}{2} \right],$$

где K определяется так же, как ранее;

P_a — активная мощность той же установки, измеренная одновременно с измерением реактивной мощности.

Из векторной диаграммы, приведенной на том же рисунке, видно, что ваттметры измеряют мощность

$$P = I_1 U_{03} \cos(60^\circ - \varphi) + I_2 U_{01} \cos(60^\circ - \varphi) + I_3 U_{02} \cos(60^\circ - \varphi) = \sqrt{3} IU \cos(60^\circ - \varphi).$$

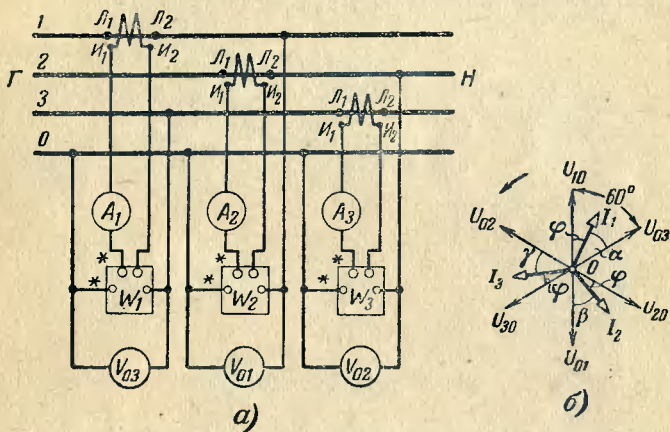


Рис. 28. Вариант схемы трех ваттметров для измерения реактивной мощности в трехфазной четырехпроводной установке.

а — схема соединения приборов; б — векторная диаграмма схемы.

Производя тригонометрические преобразования и умножая обе части равенства на $\frac{2}{\sqrt{3}}$, получаем

$$\frac{2}{\sqrt{3}} P = IU \cos \varphi + \sqrt{3} IU \sin \varphi,$$

или

$$\frac{2}{\sqrt{3}} P = P_a + \sqrt{3} Q,$$

откуда

$$Q = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(P - \frac{P_a}{2} \right).$$

Пример 18. Измеряется активная и реактивная мощности трехфазной четырехпроводной линии 380/220 в со смешанной нагрузкой. Установлены трансформаторы тока $\frac{200}{5} a$.

Активная мощность, измеренная по схеме трех ваттметров (рис. 22), равна 79 *квт*. Для измерения реактивной мощности применим схему трех ваттметров с использованием фазных напряжений (рис. 28). Ваттметры применим обычные, активной мощности, например типа Д 527/3, класса 0,5 с пределами по току 5 а и по напряжению 300 в, шкала 75 делений.

$$\text{Постоянная ваттметра } C_{\text{вт}} = \frac{5 \cdot 300}{75} = 20 \text{ в} \text{ p/1}^\circ \text{ и}$$

$$K = 20 \cdot \frac{200}{5} 10^{-3} = 0,8 \text{ квар/1}^\circ.$$

При измерении отсчитаны показания ваттметров.

$$\alpha_1 = 61^\circ, \alpha_2 = 43^\circ, \alpha_3 = 60^\circ.$$

Реактивная мощность равна

$$Q = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[0,8(61 + 43 + 60) - \frac{79}{2} \right] = 105 \text{ квар},$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{105}{79} = 1,33.$$

По тригонометрическим таблицам находим

$$\cos \varphi = 0,6, \quad \sin \varphi = 0,8.$$

8. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ПРИ ПОВЕРКАХ ВАТТМЕТРОВ

Все ваттметры, как щитовые, так и переносные, разделяются на две основные группы: ваттметры непосредственного включения и ваттметры, включаемые через измерительные трансформаторы.

Ваттметры непосредственного включения могут выполняться примерно для токов до 50 а и напряжений до 400 в и, следовательно, могут измерять мощность в трехфазных установках порядка $P = \sqrt{3} \cdot 50 \cdot 400 \cdot 0,85 \cdot 10^{-3} = 30 \text{ квт}$ (принят $\cos \varphi = 0,85$). Затрачивать такую мощность при проверке ваттметров нерационально. Поэтому проверку ваттметров любой мощности производят в искусственной схеме, с разделенными цепями тока и напряжения. Токовая нагрузка создается в отдельной низкоомной цепи, питаемой пониженным напряжением

(несколько вольт), благодаря чему мощность затрачиваемая в этой цепи, невелика. Цепи напряжения создаются в высокоомной цепи с номинальным напряжением ваттметра, и потеря мощности в этой цепи в основном определяется потреблением цепей напряжения, которое невелико.

При поверке ваттметров применяют либо метод сличения, либо компенсационный метод.

Метод сличения. Поверка всех щитовых и переносных ваттметров невысокого класса точности производится методом сличения их показаний с показаниями образцового ваттметра.

Ваттметры, предназначенные для включения через измерительные трансформаторы, имеют вторичный номинальный ток 5 а (или 1 а) и вторичное номинальное напряжение 100 в . Шкала градуируется с учетом коэффициентов трансформации трансформаторов тока и трансформаторов напряжения и $\cos\varphi$ — порядка $0,8$ — $0,9$, так как ваттметр измеряет мощность $P = UI \cos\varphi$, где $I \cos\varphi$ — активная составляющая полного тока I нагрузки, зависящая от $\cos\varphi$. Если ваттметр отградуировать для значения $\cos\varphi = 1$, то при номинальном токе I и напряжении U_n ваттметра и $\cos\varphi$, например, равном $0,8$, показания ваттметра будут составлять 80% полного.

Можно отградуировать ваттметр для значения тока, например, $0,8I_n$, и тогда при $\cos\varphi = 0,8$ показание ваттметра будет 100% . При $\cos\varphi = 0,7$ (при тех же $0,8I_n$ и U_n) активная мощность будет меньше и показание ваттметра будет $\frac{0,7}{0,8} \cdot 100\% = 88\%$. Но при $\cos\varphi = 0,9$ активная мощность будет больше и стрелка ваттметра уйдет за шкалу.

Трехфазные ваттметры градуируются исходя из выражения мощности трехфазного тока $P = \sqrt{3}UI \cos\varphi$, причем активная составляющая тока, т. е. значение $\cos\varphi$, подбирается так, чтобы предел измерения ваттметра соответствовал ближайшему меньшему числу стандартного ряда чисел. Например, мегаваттметр с пределом измерения 30 Мвт , предназначенный для включения с измерительными трансформаторами $\frac{3000}{5}\text{ а}$ и $\frac{6000}{100}\text{ в}$, градуирован

для значения $\cos \varphi = \frac{30 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 3000} \cong 0,96$, т. е. для значения активного тока $0,96 \cdot 3000 = 2860$ а.

Однофазные переносные ваттметры, включая и лабораторные, несмотря на малое потребление мощности (примерно 600 вт), также поверяются в схемах с разделенными цепями тока и напряжения из-за удобства регулировки в таких схемах тока и напряжения.

На рис. 29 для примера показана схема поверки трехфазного ваттметра активной мощности, предназна-

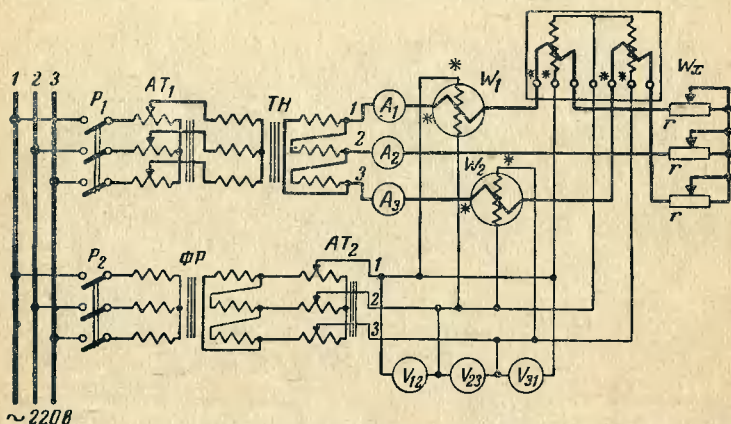


Рис. 29. Схема поверки трехфазного ваттметра.

ченного для включения с трансформаторами тока и трансформаторами напряжения.

Цепь тока состоит из трех понижающих нагрузочных трансформаторов *НТ* 220/12 в, мощностью 100—500 ва, включенных для уменьшения гармоник по схеме звезда—треугольник, трех регулировочных автотрансформаторов *АТ*₁ типа ЛАТР-2 и трех выравнивающих нагрузку низкоомных реостатов с сопротивлением порядка 1—2 ом, 10 а.

Цепь напряжения состоит из фазорегулятора *ФР*, например типа ФР 64-4 220 в, 1 ква, соединенного также по схеме звезда—треугольник, и трех регулировочных автотрансформаторов *АТ*₂ типа ЛАТР-2, включенных в звезду со стороны вторичной обмотки фазорегулятора.

Пределы регулировки такой схемы обеспечивают не только поверку ваттметров с вторичным током 5 а и вторичным напряжением 100 в, но и ваттметров непосредственного включения на токи до 50 а.

Образцовые приборы по своему классу точности должны быть не менее чем в 3 раза выше классом, поверяемого прибора. Например, если поверяется ваттметр класса 1,5, то в качестве образцового необходимо применить ваттметры класса 0,5 и т. д.

Образцовые ваттметры соединяются по схеме двух ваттметров (схема Арона). Коэффициент образцовых ваттметров, т. е. число *вт* или *квт* на одно деление их шкалы, определяется исходя из коэффициентов трансформации трансформаторов тока и трансформаторов напряжения поверяемого ваттметра (указано на его шкале) и постоянной самого образцового ваттметра, т. е.

$$K = C_{вт} k_{ТТ} k_{ТН} \cdot 10^{-3} [\text{квт}/1^\circ],$$

причем

$$C_{вт} = \frac{I_n U_n}{\alpha_n},$$

где I_n и U_n — номинальные ток и напряжение образцового ваттметра;

α_n — номинальное (полное) число делений шкалы образцового ваттметра.

Пример 19. Поверке подлежит трехфазный щитовый ваттметр со шкалой 30 000 *квт* (30 *Мвт*), включаемый с трансформаторами тока $\frac{3\ 000}{5}$ а и трансформаторами напряжения $\frac{6\ 000}{100}$ в.

Образцовые ваттметры взяты 5 а, 100 в, 100 делений. Тогда коэффициент ваттметра

$$K = \frac{5 \cdot 100 \cdot 3\ 000 \cdot 6\ 000}{100 \cdot 5 \cdot 100} \cdot 10^{-3} = 180 \text{ квт}/1^\circ.$$

Поверка ваттметров производится согласно инструкции при $\cos \varphi = 1; 0,5$ и 0. Эти значения $\cos \varphi$ легко устанавливаются по показаниям образцовых ваттметров (рис. 5). При $\cos \varphi = 1$ показания ваттметров одинаковы и положительны ($+\alpha_1 = +\alpha_2$). При $\cos \varphi = 0,5$ показания одного ваттметра равны нулю ($\alpha_1 = 0$). При $\cos \varphi = 0$ показания обоих ваттметров равны, но противоположны по знаку.

При поверке напряжение на зажимах ваттметра устанавливается номинальным и поддерживается по вольтметрам; регулировка производится в цепях тока.

Компенсационный метод. Поверка образцовых и лабораторных ваттметров класса 0,1; 0,2 и 0,5 производится на потенциометрической (компенсационной) установке постоянного тока также в схеме с разделенными цепями тока и напряжения.

Поверку можно производить на одном потенциометре, которым поочередно измеряются ток и напряжение в цепях поверяемого ваттметра. Так как при поверке напряжение на зажимах ваттметра поддерживается все время номинальным, а изменяется ток, то напряжение, раз установленное по потенциометру, далее периодически контролируется по этому же потенциометру. Этот контроль рекомендуется производить после проверки каждой точки шкалы ваттметра. Также периодически проверяется постоянство рабочего тока потенциометра.

Так как предел измерения потенциометра по напряжению обычно не превышает 2 в, то для измерения напряжения ваттметра применяется делитель напряжения. Коэффициент делителя K_d выбирается так, чтобы напряжение, снимаемое с делителя, было меньше номинального предела потенциометра и в то же время чтобы отсчет на потенциометре производился не менее как на четырех декадах. Для измерения тока применяется образцовая катушка сопротивления $r_{об}$, включаемая последовательно с токовой цепью поверяемого ваттметра.

Величина сопротивления образцовой катушки $r_{об}$ выбирается исходя из предела измерения по току поверяемого ваттметра I_n и предела измерения потенциометра U_n .

При выборе катушки необходимо выдержать следующие условия:

$$I_n r_{об} \leq U_n, \quad I_n r_{об} > 20 \text{ мв} \text{ и } I_n^2 r_{об} \leq P_{к.н},$$

где $P_{к.н}$ — допустимая мощность катушки для своего класса точности (для класса 0,05 $P_{к.н} = 3 \text{ вт}$).

Измеренное значение тока определяется по выражению

$$I = \frac{U}{r_{об}},$$

где $U [в]$ — показание потенциометра при измерении падения напряжения на образцовой катушке сопротивления.

**Выбор образцовых катушек сопротивления
при поверке ваттметров**

Предел измерения ваттметров по току I, a	$r_{об}, ом$	$U, в$
50—20	0,001	0,05—0,02
15—5	0,01	0,15—0,05
5—1	0,1	0,5—0,1
1—0,1	1	1—0,1
0,1—0,01	10	1—0,1
0,01—0,001	100	1—0,1

Пример 20. Потенциметрическая установка с потенциометром типа ППТВ/1, имеющим пределы измерения от 10 мкв до 1,2 в (через 10 мкв), и делителем напряжения до 600 в с коэффициентом деления 10, 100 и 500. Поверяется ваттметр типа Д 539/5 класса 0,5 с пределами измерения по току 0,5 а и по напряжению 150 в, шкала 75 делений. Проверка производится на отметке шкалы 75 делений, чему соответствует мощность $P_n = 0,5 \cdot 150 = 75 \text{ вт}$.

По приведенной таблице выбираем образцовую катушку $r_o = 1 \text{ ом}$.

Определяем коэффициент делителя $\frac{U_{\text{ватт}}}{U_{\text{н.потенц}}} = \frac{150}{1,2} = 125$.

Выбираем ближайшее большее значение $K_D = 500$.

Производим измерение напряжения, подведенного к цепи напряжения ваттметра, $U = 0,3 \text{ в}$.

Переключая потенциометр на цепь тока, измеряем падение напряжения на образцовой катушке $U_I = 0,5 \text{ в}$.

Тогда истинное значение мощности на отметке 75 шкалы ваттметра равно $P = \frac{0,5}{1} \cdot 0,3 \cdot 500 = 75 \text{ вт}$.

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ПРИБОРАМИ

В каждом указывающем электроизмерительном приборе при измерении расходуется некоторая мощность, отбираемая из цепи, в которой производится измерение. Эта мощность затрачивается на механическую энергию отклонения подвижной системы прибора, на создание магнитных потоков и на нагрев цепей прибора. Мощность, потребляемая переносными приборами, при неправильном их использовании может привести к большой погрешности измерения. Поэтому для правильного использования прибора необходимо знать потребляемую

им мощность. Она зависит от угла отклонения стрелки прибора и достигнет номинального значения при номинальном угле отклонения. В связи с этим для переносных (лабораторных) приборов более удобным является выражение потребляемой мощности для токовых цепей посредством номинального падения напряжения, а для цепей напряжения — номинального тока.

Если необходимо определить мощность цепей прибора, то она обычно определяется как полная мощность в вольт-амперах для токовых цепей путем перемножения номинального тока прибора на номинальное падение напряжения в токовой цепи (подлежит определению) и для цепи напряжения — путем перемножения номинального напряжения прибора на номинальный ток цепи напряжения (подлежит определению).

Сопротивление приборов и точность измерения. Покажем, насколько может исказить результат измерений сопротивление прибора.

Пример 21. Допустим, мы измеряем по методу амперметра-вольтметра сопротивление обмотки r_x мощного трансформатора. В качестве амперметра применили милливольтметр mV_1 45 мв с шунтом $r_{ш}$ 7,5 а и для измерения напряжения применили такой же милливольтметр mV_2 45 мв с внутренним сопротивлением 10 ом. Схема измерений показана на рис. 31,а.

При установленном токе 4 а показания милливольтметра оказались 44 мв, откуда

$$r = \frac{44 \cdot 10^{-3}}{4} = 0,011 \text{ ом.}$$

Однако сопротивление амперметра, исходя из его номинальных данных $I_H = 7,5 \text{ а}$, $U_H = 45 \text{ мв}$, равно $r_a = \frac{45 \cdot 10^{-3}}{7,5} = 0,006 \text{ ом}$ и, следовательно, истинное сопротивление обмотки составляет

$$r_x = r - r_a = 0,011 - 0,006 = 0,005 \text{ ом.}$$

Рассмотренный пример показывает, что без учета сопротивления амперметра ошибка в измерении превышает 100 % (измерено 0,011 ом вместо 0,005 ом).

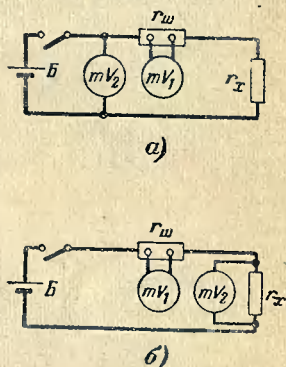


Рис. 31. Схема измерения малых сопротивлений по методу амперметра-вольтметра.
а — неправильная; б — правильная.

На рис. 31,б показан правильный вариант схемы, не требующий внесения поправок, так как ток потребления милливольтметра, измеряемый амперметром, увеличивает ток измерения на малую величину (несколько миллиампер по сравнению с несколькими амперами). В этом случае при токе 7 а показания милливольтметра оказались 35 мв, откуда сразу получается правильное значение измеряемого сопротивления

$$r_x = \frac{35 \cdot 10^{-3}}{7} = 0,005 \text{ ом.}$$

Определение падения напряжения в амперметрах может производиться милливольтметром с любым внутренним сопротивлением, так как ток, протекающий через амперметр, измеряется им же (при испытаниях устанавливается полное отклонение стрелки) и не зависит от тока, протекающего по параллельной цепи, образованной цепью милливольтметра mV_2 .

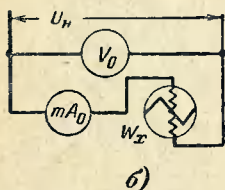
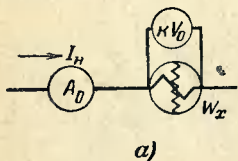


Рис. 32. Определение параметров обмоток ваттметров.

а — токовой; б — напряже-
ния.

Для амперметра постоянного тока падение напряжения на его зажимах измеряется милливольтметром или же потенциометрической установкой. Для амперметров переменного тока проще всего применить катодный милливольтметр с электронным усилителем, например типа ЛВ-9 с пределами измерения от 10 мв и выше или аналогичный. Точность измерения может лежать в пределах 2,5—5%.

Определение параметров ваттметров. При испытании ваттметров применяется схема, изображенная на рис. 32. При определении падения напряжения в токовой цепи применяется катодный вольтметр типа ЛВ-9 или аналогичный; амперметр по пределу измерения должен соответствовать номинальному току ваттметра, который при измерении и устанавливается.

Для лабораторных ваттметров, кроме общего падения напряжения в токовой цепи, определяется активное сопротивление и индуктивность токовой цепи. Обычно это выполняется при помощи компенсатора переменного тока. Для этой цели может быть использован компенсатор типа Р56 с пределами измерения 0,16 и 1,6 в

(цена деления на меньшем пределе измерения составляет 0,1 мв). Этот компенсатор по принципу своего действия дает возможность измерять активную и реактивную составляющие измеряемого напряжения. Величина каждой составляющей непосредственно отсчитывается по показаниям курбельных переключателей и лимбам оси X и оси Y компенсатора при полной компенсации измеряемого напряжения.

Измерение производится при номинальном токе, измеряемом амперметром, включенным последовательно с токовой цепью ваттметра.

Сопротивления обмоток в омах подсчитывается по выражениям:

активное

$$r = \frac{U_x}{I},$$

индуктивное

$$x = \frac{U_y}{I},$$

полное (кажущееся)

$$z = \sqrt{r^2 + x^2}.$$

Индуктивность в миллигенри

$$L = \frac{x}{2\pi f} 10^{-3},$$

где U_x и U_y — показания курбельных переключателей компенсатора;
 f — частота.

Пример 22. Определяются параметры токовой обмотки ваттметра типа Д 542/1 на пределе 0,25 в. При установленном токе 0,25 а при компенсации отсчитываем по показаниям курбельных переключателей и по лимбу оси X $U_x = 0,652$ в; по лимбу оси Y $U_y = 0,212$ в.

$$\text{Тогда } r = \frac{0,652}{0,25} \cong 2,6 \text{ ом},$$

$$x = \frac{0,212}{0,25} \cong 0,848 \text{ ом}, \quad L = \frac{0,848}{2\pi 50} \cdot 10^{-3} \cong 2,7 \text{ мГн},$$

$$z = \sqrt{2,6^2 + 0,848^2} = 2,74 \text{ ом}.$$

При определении номинального тока цепи напряжения следует применить миллиамперметр с малым внутренним сопротивлением. Необходимо, чтобы $r_{\text{ма}} \leq \frac{r_x}{1000}$.

Это условие легко выполняется, особенно если измерение провести на постоянном токе, что возможно, так как сопротивление лабораторных и контрольных ваттметров является чисто активным (сопротивление миллиамперметров постоянного тока значительно меньше сопротивления миллиамперметров переменного тока при одном и том же пределе измерения).

Мощность, потребляемая щитовыми приборами, определяется в вольт-амперах. Исключение составляют цепи напряжения счетчиков, потребление мощности которых определяется в ваттах. Это связано с тем, что мощность, теряемая в цепях напряжения счетчиков, является потерей, которая в масштабах страны представляет внушительную величину. Поэтому предельное значение мощности, теряемой в цепях напряжения счетчиков, нормируется и согласно ГОСТ 6570-60 не должно превышать 1,5 *вт* на фазу для наиболее массовых счетчиков активной энергии классов 2,0 и 2,5.

Щитовые приборы косвенного включения являются нагрузкой на измерительные трансформаторы. Класс точности и трансформаторов тока и трансформаторов напряжения определяется для предельного значения нагрузки трансформатора для данного класса; с увеличением нагрузки класс точности измерительных трансформаторов снижается.

Так, например, длительная максимальная мощность трансформатора напряжения типа НОМ-6 6000/100 *в*, 400 *ва*. Однако, для того чтобы удовлетворить определенному классу точности, трансформатор должен быть нагружен значительно меньше. Классу точности 0,5 соответствует нагрузка 50 *ва*; при нагрузке 80 *ва* — класс 1,0 и при нагрузке 120 *ва* — класс 3,0.

Еще резче зависимость класса точности от нагрузки проявляется у трансформаторов тока. Поэтому для расчетного определения нагрузки измерительных трансформаторов необходимо знать мощность, потребляемую приборами. Определение мощности щитовых приборов про-

изводится по приведенным выше схемам при номинальных токах I_n и напряжениях U_n и определяется в вольтамперах по формуле $P_n = I_n U_n$.

Для щитовых приборов непосредственного включения величина потребляемой мощности существенного значения не имеет и обычно не определяется.

Мощность, потребляемая в цепях напряжения счетчиков, определяется ваттметром по схеме рис. 33. Ваттметр должен быть малокосинусный, так как катушка счетчика имеет большое реактивное сопротивление, и на малые пределы измерения по току. Из ваттметров, выпускаемых отечественной промышленностью, могут быть применены ваттметр типа Д 529/1, класс 0,5 с пределами измерения по току от 50 ма и выше или малокосинусный ваттметр типа Д 542/1 с меньшим пределом измерения по току 250 ма и с пределами по напряжению от 30 до 300 в.

Результат измерения в ваттах определяется по показанию ваттметра в делениях путем умножения на постоянную ваттметра. Для малокосинусных ваттметров постоянная указывается на шкале ваттметра и не равна произведению тока на напряжение.

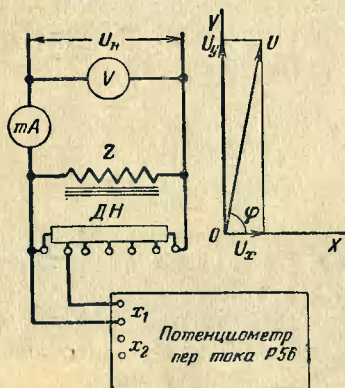


Рис. 34. Определение мощности, потребляемой цепью напряжения счетчика при помощи компенсатора переменного тока.

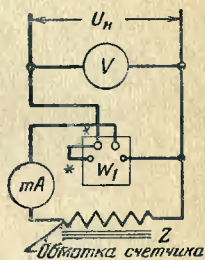


Рис. 33. Определение мощности, потребляемой цепью напряжения счетчика при помощи малокосинусного ваттметра.

Определение активной мощности, теряемой в обмотке напряжения счетчика, может быть также произведено при помощи компенсатора переменного тока типа Р56 с применением делителя напряжения типа Р501. Пределы измерения делителя от 3 до 300 в выбираются в соответствии с номинальным напряжением катушки счетчика. Схема измерения приведена на

рис. 34. Испытуемая катушка включается на номинальное напряжение, измеряемое вольтметром V . Миллиамперметр mA измеряет ток, потребляемый катушкой. Напряжение к катушке подводится через делитель напряжения и измеряется по компенсационному методу.

Составляющая напряжения, отсчитываемая в момент компенсации по оси X компенсатора, является активной составляющей напряжения, обусловливаемой потерями в меди и стали сердечника катушки. Если измеренный миллиамперметром ток, протекающий через катушку, равен I_n , то потеря мощности в катушке равна

$$P = I_n U_x [вт],$$

где U_x — отсчет напряжения по оси X .

Отсчет напряжения по оси Y дает возможность определить реактивную мощность катушки и ее собственный угол, т. е. угол сдвига между напряжением, приложенным к катушке и протекающим по ней током, а именно:

$$Q = I_n U_y [вар] \text{ и } \operatorname{tg} \varphi = \frac{U_y}{U_x}.$$

По тригонометрическим таблицам определяется значение угла φ .

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ОБМОТКАМИ РЕЛЕ

Мощность в вольт-амперах, потребляемая обмотками реле, и характеризующая нагрузку на измерительные трансформаторы, определяется так же, как и для измерительных приборов (§ 9).

В отдельных случаях, например при испытании реле направления мощности, бывает необходимо определить собственный угол между током в обмотке напряжения и напряжением на ее выводах. Наиболее просто и точно это определение производится при помощи компенсатора переменного тока типа Р56 с делителем напряжения, так же как это было описано выше, применительно к катушке напряжения счетчика.

Определение собственного угла катушки напряжения может быть произведено также при помощи вектор-

метра типа Ц50, имеющего пределы измерения по напряжению 0,15—300 в, по току 0,003—5 а и по углу сдвига фаз 0—360°.

Собственный угол катушки напряжения может также быть определен при помощи малокосинусного ваттметра (рис. 38), например типа Д 542/1. Полная мощность катушки S определяется в вольт-амперах по показаниям миллиамперметра и высокоомного вольтметра, например типа Д 523/3 (ток потребления 3 ма). Если мощность, измеренная ваттметром, равна P , то собственный угол катушки определения из соотношения $\cos \varphi = \frac{P}{S}$.

12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ БЫТОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ

Мощность, потребляемая от сети радиоприемником, телевизором, холодильником, стиральной машиной, плиткой и т. п., может быть определена по квартирному счетчику электроэнергии.

Перед измерением мощности, например, телевизора все потребители электроэнергии, подключенные к данному счетчику, должны быть отключены (лампы, радиоприемники и т. п., испытуемый телевизор). Это лучше всего сделать днем. При этом условии диск счетчика должен оставаться неподвижным и в окошке счетчика должна быть видна красная метка на ребре диска.

Затем включается телевизор: диск счетчика начинает вращаться. Отсчитывается не менее 10 оборотов диска. Замечаются по секундной стрелке часов начало отсчета и конец отсчета.

Измеряемая мощность в ваттах определяется по формуле

$$P = \frac{3600}{n} \cdot \frac{N}{t} 1000,$$

где n — передаточное число счетчика, т. е. число оборотов диска счетчика, соответствующее 1 квт·ч (указано на табличке счетчика);

N — число оборотов, отсчитанное за t секунд.

Пример 23. Требуется определить мощность, потребляемую телевизором «Рубин». Телевизор включен на 127 в. Счетчик типа СО-2 (10 а, 127 в; 1 квт · ч = 1 250 оборотов диска.

Отсчитано $N = 10$ оборотов диска за $t = 165$ сек,

$$\text{тогда } P = \frac{3600}{1250} \cdot \frac{10}{165} \cdot 1000 = 175 \text{ вт.}$$

При наличии амперметра мощность, потребляемая в ваттах плиткой, утюгом или лампой накаливания, определяется как произведение значения измеренного амперметром тока в амперах на номинальное напряжение сети в вольтах.

Для счетчиков старых выпусков и иностранных фирм иногда передаточное число счетчика выражается как 1 гектоватт-час = n оборотов диска. Тогда мощность в ваттах определяется по формуле

$$P = \frac{360}{n} \frac{N}{t} \cdot 1000.$$

Если же на табличке счетчика указано: «При P ваттах — n оборотов в минуту», то мощность по счетчику в ваттах определяется по формуле

$$P = \frac{60P}{n} \frac{N}{t}.$$

13. ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ

При проведении различных специальных испытаний, например таких, как испытание выключателей на разрывную мощность, исследование машин в режиме коротких замыканий, исследование явлений, связанных с устойчивостью параллельной работы электростанций, и в других случаях необходимо измерять мгновенное значение мощности переменного тока.

Мгновенное значение мощности переменного тока

$$\begin{aligned} p &= ui = U_{\text{макс}} \sin \omega t I_{\text{макс}} \sin (\omega t + \varphi) = \\ &= \frac{U_{\text{макс}} I_{\text{макс}}}{2} \cos \varphi - \frac{U_{\text{макс}} I_{\text{макс}}}{2} \cos (2\omega t + \varphi) = \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos (2\omega t + \varphi), \end{aligned}$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота переменного тока.

Как видно из приведенного выражения, мгновенная мощность состоит из постоянной составляющей $UI \cos \varphi$,

представляющей собой активную постоянную мощность, и переменной составляющей $UI\cos(2\omega t + \varphi)$, изменяющейся по гармоническому закону с двойной частотой и имеющей среднее значение за период, равное нулю. Ваттметр, включенный в цепь переменного тока, измеряет среднее значение активной мощности, равное произведению действующих значений тока и напряжения на косинус угла между ними.

Переменная составляющая мощности не вызывает колебаний стрелки ваттметра, так как в силу своей инертности подвижная система не успевает следовать за колебаниями переменной составляющей мощности с частотой 100 гц.

Для измерения мгновенного значения мощности в любой момент времени применяется осциллограф с вибратором¹ мощности. Вибратор мощности представляет собой обычную для вибраторов петлю (один виток) с наклеенным посередине зеркальцем, помещенную в воздушный зазор электромагнита, и является по существу ферродинамическим измерителем. Однофазный вибратор мощности имеет два зажима петли, включаемой с добавочным сопротивлением в цепь напряжения, и два зажима обмотки возбуждения (электромагнита), включаемой в цепь тока. Конструкция вибратора обеспечивает пропорциональность магнитного поля измеряемому току и отсутствие собственного углового сдвига.

На рис. 35 изображены осциллограммы мощности синусоидального переменного тока для нескольких значений $\cos \varphi$. На осциллограммы мощности p наложены осциллограммы тока i и напряжения u и для расшифровки осциллограммы мощности проводятся две нулевые линии: одна — нулевая линия вибратора мощности 0_1-0_1 (она же нулевая линия синусоид тока и напряжения) и вторая — нулевая линия кривой мощности 0_2-0_2 . Если обозначить двойную амплитуду кривой мощности в виде суммы $a+b$, где a — часть амплитуды выше нулевой линии вибратора, b — часть амплитуды ниже нулевой линии, то справедливы следующие соотношения:

1. Мгновенная мощность

$$p = ui = K(a + b).$$

¹ Раньше вибраторы назывались шлейфами.

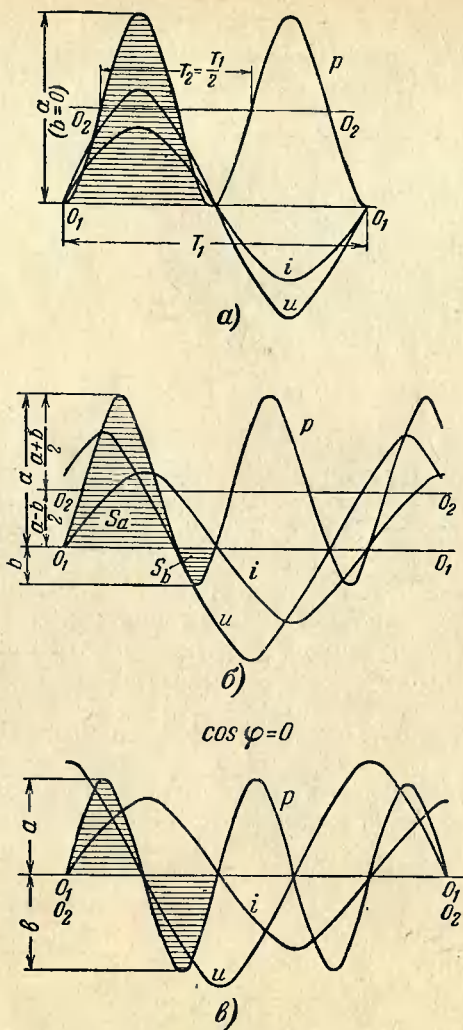


Рис. 35. Осциллограммы мощности.
 $a - \cos \varphi = 1$; $b - \cos \varphi = 0,7$; $\epsilon - \cos \varphi = 0$.

2. Полная (кажущаяся) мощность

$$S = IU = \frac{ui^*}{2} = K \frac{a+b}{2}.$$

* Так как среднее значение произведения ординат двух синусоид за период равно половине произведения их амплитуд.

3. Активная мощность

$$P = IU \cos \varphi = K \left(\frac{a+b}{2} - b \right) = K \left(\frac{a-b}{2} \right).$$

4. Реактивная мощность

$$\begin{aligned} Q &= IU \sin \varphi = \sqrt{S^2 - P^2} = \\ &= K \sqrt{\left(\frac{a+b}{2} \right)^2 - \left(\frac{a-b}{2} \right)^2} = K \sqrt{ab}. \end{aligned}$$

5.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = K \frac{a-b}{a+b},$$

где K — постоянный коэффициент, зависящий от чувствительности вибратора.

При несинусоидальном токе (напряжении) кривая мощности также несинусоидальна. В этом случае приведенные выше соотношения не верны и определение действительных мощностей может быть определено только по площадям, очерченным кривой мощности выше и ниже нулевой линии вибратора. Определение мощности производится планиметром, для чего осциллограмма снимается на достаточно большой скорости.

Так, например, если на осциллограмме площадь кривой мощности, расположенной выше нулевой линии, измеренная планиметром, равна S_a мм² и площадь, расположенная ниже нулевой линии, равна S_b мм², причем длина по оси времени в первом случае равна l_1 мм и во втором l_2 мм, то активная мощность несинусоидального тока может быть определена по выражению

$$P = \frac{K}{2} \left(\frac{S_a}{l_1} - \frac{S_b}{l_2} \right).$$

Нашей промышленностью выпускается два типа однофазных вибраторов мощности Д I-XI и Д I-XII, параметры которых приведены в табл. 4.

Для расшифровки осциллограмм, а также для выбора добавочных сопротивлений и тока возбуждения перед осциллографированием необходимо знать постоянную вибратора, т. е. число ватт на 1 мм отклонения луча на

Таблица

Параметры	Единица измерения	Тип вибратора ДІ	
		XI	XII
Собственная часть вибратора в воздухе	<i>гц</i>	2 200	2 200
Чувствительность при длине луча 1 м	<i>мм/а²</i>	400	4 000
Допустимое действующее значение тока в петле	<i>ма</i>	20	20
Допустимое действующее значение тока в обмотке электромагнита	<i>а</i>	5	0,5
Спротивление петли не более	<i>ом</i>	7	7
Спротивление обмотки электромагнита на постоянном токе не более	<i>ом</i>	0,07	6,2
Спротивление обмотки электромагнита на переменном токе 50 гц не более	<i>ом</i>	0,15	17

фотобумаге или, что более удобно, число ампер в квадрате на 1 мм.

Постоянная вибратора есть обратная величина чувствительности и, например, для вибратора типа ДІ-XI номинально равна

$$K = \frac{1}{400} = 0,0025 \text{ а}^2/\text{мм}.$$

Постоянная, выраженная в *вт/мм*, находится путем умножения токовой постоянной на величину добавочного сопротивления в цепи петли.

Добавочное сопротивление в цепи петли определяется номинальным напряжением в схеме осциллографирования и номинальным током петли вибратора. Так, например, для вибратора типа ДІ-XI (ток петли $I_B = 20 \text{ ма}$) при напряжении $U = 100 \text{ в}$ добавочное сопротивление в цепи петли определится из выражения $r_d = \frac{U}{I_B} - r_b = \frac{100}{0,02} - 7 = 4993 \text{ ом}$, и тогда постоянная вибратора в ваттах будет равна

$$K = 0,0025 \cdot 5000 = 12,5 \text{ вт/мм}.$$

Обычно для каждого вибратора мощности его постоянная определяется опытным путем на постоянном

или на переменном токе для безреактивной нагрузки. При этом надо иметь в виду, что при одном и том же действующем значении тока, отклонение луча вдвое меньше от постоянного тока по сравнению с переменным током, так как на переменном токе луч отклоняется от нулевой линии в обе стороны.

При осциллографировании мощности трехфазного тока применяются схемы такие же, как при измерении мощности одним ваттметром. Для примера на рис. 36 приведена схема осциллографирования с искусственной нулевой точкой применительно к установке высокого напряжения для равномерной и симметричной нагрузки. Здесь применен вибратор типа ДІ-ХІ с номинальным током 5 а, для токовой цепи (цепь возбуждения) и 20 ма—для цепи напряжения. Величина добавочного сопротивления в цепи петли $r_d = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 0,02} = 7 = 2883 \text{ ом}$. Остальные сопротивления звезды сопротивлений

$$r_1 = r_2 = 2890 \text{ ом.}$$

Измеряемая мгновенная мощность одной фазы определится по выражению

$$p = K'_B \cdot k_{TT} \cdot k_{TH} (a + b) 10^{-3} = K (a + b),$$

где K'_B — постоянная вибратора в вт/мм с добавочным сопротивлением;

k_{TT} и k_{TH} — коэффициенты трансформации трансформатора тока и трансформатора напряжения;

$a + b$ — двойная амплитуда (полный размах колебаний) кривой мощности.

Расшифровка осциллограммы производится путем изменения амплитуд осциллограммы циркулем в мм в интересные нас моменты времени и умножения полученного значения на пересчетный коэффициент $K = K'_B \cdot k_{TT} \cdot k_{TH} \times 10^{-3} \text{ [квт/мм]}$.

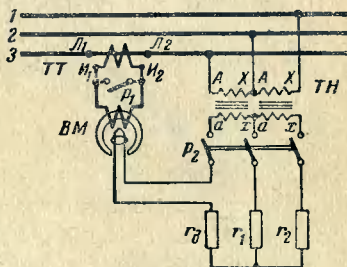


Рис. 36. Осциллографирование мощности в трехфазной системе одним вибратором мощности ВМ.

Значения активной, реактивной и полной мощности определяются по формулам, приведенным выше.

Точность измерения мощности вибратором относительно невелика, и погрешность доходит до 3—5%.

Для уменьшения погрешности необходимо размер двойной амплитуды кривой мощности устанавливать не менее 40—50 мм, исходя из того, что погрешность измерения амплитуд циркулем и линейкой производится с точностью до 0,2 мм.

Для повышения точности измерения весьма желательно на той же пленке (бумаге) заснять масштаб мощности, т. е. заосциллографировать известное значение мощности, измеренное по ваттметру.

В этом случае перед расшифровкой осциллограммы должен быть определен масштаб мощности (т. е. коэффициент K) путем деления известного значения активной мощности на величину $\frac{a-b}{2}$ мм. Определение масштаба должно производиться особенно тщательно путем нескольких измерений и определения среднего значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурьянов Б. П., Магнитоэлектрический осциллограф, Госэнергоиздат, 1952.

2. Вострокнутов Н. Г., Электрические счетчики, Госэнергоиздат, 1959.

3. Горюнов П. Н., Пигин С. М., Шумиловский Н. Н., Электрические счетчики, Госэнергоиздат, 1951.

4. ГОСТ на электроизмерительные приборы и счетчики.

5. Мансуров Н. П., Попов В. С., Теоретическая электротехника, Госэнергоиздат, Физматиздат, 1958.

6. Минин Г. П., Эксплуатация электроизмерительных приборов, Госэнергоиздат, 1959.

7. Сыромятников И. А., Режимы работы асинхронных двигателей, Госэнергоиздат, 1950.

8. Шкурин Г. П., Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Военное издательство, 1960.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНОСНЫХ ВАТТМЕТРОВ

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Таблица I-1

Однофазные ваттметры

Тип	Номинальный ток, <i>a</i>	Номинальное напряжение, <i>e</i>					Данные токовой цепи	
		30	75	150	300	600	Активное сопротивление, <i>ом</i>	Индуктивность, <i>мкГн</i>
		Верхние пределы измерения, <i>вт</i>						

Серия Д 527, класс 0,5, шкала 75 делений

Д 527/1	0,15—0,3	—	—	22,5—45	45—90	—	6—1,5	12—3
Д 527/2	0,5—1	—	—	75—150	150—300	—	0,6—0,15	1—0,25
Д 527/3	2,5—5	—	—	375—750	750—1 500	—	0,06—0,03	0,04—0,01
Д 527/4	5—10	—	—	750—1 500	1 500—3 000	—	0,03—0,01	0,01—0,003

Сопротивление цепей напряжения 5 000 и 10 000 *ом*

Серия Д 529, класс 0,5, шкала 75 делений

Д 529/1	0,05—0,1	1,875—3,75	3,75—7,5	7,5—15	15—30	—	2—0,5	4—1
Д 529/2	0,25—0,5	—	1,875—37,5	37,5—75	75—150	150—300	0,2—0,2	0,4—0,2
Д 529/3	0,5—1	18,75—37,5	37,5—75	75—150	150—300	—	0,2—0,2	0,2—0,05
Д 529/4	2,5—5	—	187,5—375	375—750	750—1 500	1 500—3 000	0,1—0,05	0,08—0,05
Д 529/5	5—10	187,5—375	375—750	750—1 500	1 500—3 000	—	0,05—0,05	0,05—0,02

Номинальный ток цепи напряжения 3 *ма*

Серия Д 539, класс 0,5, шкала 75 делений

Д 539/1	5—10	150—300	375—750	750—1 500	1 500—3 000	—	0,02—0,01	0,02—0,01
Д 539/2	5—10	—	375—750	750—1 500	1 500—3 000	3 000—6 000	0,02—0,01	0,02—0,01
Д 539/3	2,5—5	75—150	187,5—375	375—750	750—1 500	—	0,03—0,02	0,03—0,02
Д 539/4	2,5—5	—	187,5—375	375—750	750—1 500	1 500—3 000	0,03—0,02	0,03—0,02

Д 539/5	1—2	30—60	75—150	150—300	300—600	—	0,08—0,04	0,2—0,05
Д 539/6	1—2	—	75—150	150—300	300—600	600—1 200	0,08—0,04	0,2—0,05
Д 539/7	0,5—1	15—30	37,5—75	75—150	150—300	—	0,1—0,08	1—0,2
Д 539/8	0,5—1	—	37,5—75	75—150	150—300	300—600	0,1—0,08	1—0,2
Д 539/9	0,25—0,5	7,5—15	18,75—37,5	37,5—75	75—150	—	0,4—0,1	4—1
Д 539/10	0,25—0,5	—	18,75—37,5	37,5—75	75—150	150—300	0,4—0,1	4—1
Д 539/11	0,1—0,2	3—6	7,5—15	15—30	30—60	—	2—0,5	20—5
Д 539/12	0,1—0,2	—	7,5—15	15—30	30—60	60—120	2—0,5	20—5
Д 539/13	0,05—0,1	1,5—3	3,75—7,5	7,5—15	15—30	—	7—2	70—20
Д 539/14	0,05—0,1	—	3,75—7,5	7,5—15	15—30	30—60	7—2	70—20
Д 539/15	0,025—0,05	0,75—1,5	1,875—3,75	3,75—7,5	7,5—15	—	28—7	280—70
Д 539/16	0,025—0,05	—	1,875—3,75	3,75—7,5	7,5—15	15—30	28—70	280—70
Д 539/17	0,01—0,02	0,3—0,6	0,75—1,5	1,5—3	3—6	—	160—40	1 200—300
Д 539/18	0,01—0,02	—	0,75—1,5	1,5—3	3—6	6—12	160—40	1 200—300

Номинальный ток цепи напряжения 3 ма

По заказу ваттметры серии Д 539 изготавливаются на номинальное напряжение 100 в для включения через трансформаторы напряжения.

Серия Д 542, класс 0,5, малокосинусный ($\cos \varphi_H=0,1$)

Д 542/1	0,25—0,5	0,75—1,5	1,875—3,75	3,75—7,5	7,5—15	—	2,7—0,7	2,7—0,7
Д 542/2	0,5—1	1,5—3	3,75—7,5	7,5—15	15—30	—	0,7—0,18	0,7—0,18
Д 542/3	2,5—5	7,5—15	18,75—37,5	37,5—75	75—150	—	0,07—0,02	0,028—0,002
Д 542/4	5—10	15—30	37,5—75	75—150	150—300	—	0,03—0,01	0,007—0,002

Номинальный ток цепи напряжения 5 ма

Серия Д 522, класс 1,0, малокосинусный ($\cos \varphi_H=0,1$)

Д 522/1	0,25—0,5—1,0	—	1,875—3,75—7,5	3,75—7,5—15	7,5—15—30	15—30—60	1,2—0,3—0,08	2,7—0,7—0,17
Д 522/2	2,5—5—10	—	1,875—37,5—75	3,75—75—150	75—150—300	150—300—600	0,056—0,02—0,0055	30—6,8—1,7

Номинальный ток цепи напряжения 5 ма

Таблица I-2

Трехфазные ваттметры

Тип	Класс	Номинальный ток, а	Номинальное напряжение, в		Номинальный ток цепи напряжения, мА	Данные токовой цепи	
			100	150		Активное сопротивление, Ом	Индуктивность, мГн
			Пределы измерения, Вт				
Д 521	0,5	5	—	1 200	30	0,1	0,1

(Добавочное сопротивление Д 521 до 600 в)

Д 558/1	0,2	5	1 000	—	15	0,014	0,014
Д 558/2	0,2	4	750	—	15	0,017	0,020
Д 558/3	0,2	5	—	1 300	15	0,014	0,014
Д 558/4	0,2	4	—	1 000	15	0,017	0,020

Таблица I-3

Переносный измерительный комплект типа К50

Номинальный ток, а	Верхний предел измерения, квт (для одной фазы)				Данные токовой цепи		Номинальный ток цепи напряжения, мА	Примечание
	150 в	300 в	450 в	600 в	Активное сопротивление, Ом	Индуктивность, мГн		
1	0,15	0,3	0,45	0,6	1	0,35	10,5	Непосредственное включение
2,5	0,375	0,75	1,125	1,5	0,2	0,07		
5	0,75	1,5	2,25	3,0	0,06	0,02		
10	1,5	3,0	4,5	6,0	0,02	0,006		
25	3,75	7,5	11,25	15,0	0,01	0,002		
50	7,5	15,0	22,5	30,0	0,006	0,001	Включение через трансформаторы тока И508	
100	15	30	45	60				
250	37,5	75	112,5	150				
500	75	150	225	300				
600	90	180	270	360				

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСРЕДСТВОМ ИЗМЕРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Мощность на валу асинхронного двигателя при неполной нагрузке (P) может быть приближенно определена без измерения тока или мощности по величине скольжения двигателя.

Как известно, скольжение (s) определяется по выражению

$$s = \frac{n_c - n}{n_c},$$

где n_c — синхронная скорость вращения ротора (об/мин);

n — скорость вращения (об/мин) при нагрузке (P).

При номинальном напряжении U_H и номинальной нагрузке двигателя P_H скольжение имеет определенное номинальное значение s_H . При уменьшении нагрузки скорость вращения ротора увеличивается и скольжение уменьшается в прямой зависимости, т. е.

$$P = P_H \frac{s}{s_H}.$$

Из табличных данных двигателя известны номинальные мощность P_H и скорость вращения n_H , по которым вычисляется номинальное скольжение s_H и, следовательно, для определения мощности на валу для данной нагрузки двигателя необходимо измерить только величину скольжения.

Если в момент измерения скольжения напряжение на зажимах статора двигателя U отличается от номинального, то мощность на валу будет определяться выражением:

$$P = P_H \frac{s}{s_H} \left(\frac{U}{U_H} \right)^2.$$

Скольжение может быть определено путем измерения переносным тахометром числа оборотов ротора для данной нагрузки, или же, что значительно точнее, непосредственным измерением, например, стробоскопическим методом.

Для определения скольжения стробоскопическим методом на торце вала двигателя мелом наносятся метки — лучи по радиусу вала, число которых и расположение зависит от синхронного числа оборотов двигателя и дано в илжеследующей таблице.

Если освещать торец вала двигателя иеоновой лампой, питающейся от той же сети переменного тока ($f=50$ пер/сек) так, чтобы свет падал на него только от одного электрода лампы, то вследствие стробоскопического эффекта, мы будем наблюдать медленное вращение меток-лучей в направлении, обратном направлению вращения ротора двигателя.

Таблица

Число пар полюсов обмотки статора	Синхронное число оборотов, об/мин	Число меток-лучей	Расположение меток-лучей
1	3 000	1	По радиусу вала
2	1 500	2	По диаметру вала
3	1 000	3	В виде трехлучевой симметричной звезды (углы 120°)
4	750	4	Два взаимно перпендикулярных диаметра (углы 90°)
5	600	5	В виде пятилучевой симметричной звезды (углы 72°)
6	500	6	В виде шестилучевой симметричной звезды (углы 60°)

Сосчитав число лучей-меток N_s , проходящих через верхнюю точку вала за одну минуту ($T=60$ сек), можно определить скольжение по следующему выражению:

$$s = \frac{N_s}{fT} = \frac{N_s}{3000}.$$

Пример. Необходимо определить мощность асинхронного двигателя ($P_n=100$ квт, $U_n=380$ в, $n_n=1470$ об/мин), пользуясь стробоскопическим методом. Для этого на торце вала остановленного двигателя проводим мелом две метки-луча по диаметру (см. таблицу). Подсчитываем номинальное скольжение:

$$s_n = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0,020.$$

При нагруженном двигателе, освещая торец вала одним электродом неоновой лампы, считаем число лучей, проходящих через верхнюю точку вала за 1 мин $N_s=45$. При этом линейное напряжение на зажимах статора двигателя, измеренное вольтметром, оказалось $U=370$ в. Тогда скольжение, соответствующее данной нагрузке, равно

$$s = \frac{45}{3000} = 0,015$$

и искомая нагрузка двигателя

$$P = 100 \frac{0,015}{0,02} \left(\frac{370}{380} \right)^2 = 71 \text{ квт.}$$

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Общие сведения	4
2. Измерение активной мощности трехфазных генераторов	24
3. Измерение активной мощности асинхронных двигателей	39
4. Измерение активной мощности в трехфазных четырехпроводных сетях	51
5. Измерение активной мощности при опытах короткого замыкания	53
6. Измерение активной мощности при опытах холостого хода	59
7. Измерение реактивной мощности	62
8. Измерение мощности при поверках ваттметров	68
9. Определение мощности, потребляемой приборами	74
10. Определение мощности, потребляемой обмотками реле	80
11. Определение мощности бытовых электроприборов	81
12. Осциллографирование мощности	82
Литература	89
<i>Приложения</i>	90

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Вышли из печати

Чернев К. К., Обслуживание распределительных устройств высокого напряжения (*выпуск 47*)

Плетнев Л. Ф., Реле прямого действия, их наладка и проверка (*выпуск 48*)

Слоиский В. В., Электродуговая сварка алюминиевых шин проводов переменным током (*выпуск 49*)

Белов Г. В., Монтаж токопроводов из шин коробчатого сечения (*выпуск 50*)

Жуков Е. П., Монтаж проводов вторичной коммутации (*выпуск 51*)

Иевлев В. И. и Рябцев Ю. И., Монтаж трансформаторов напряжением 500 кв (*выпуск 52*)

Гуреев И. А., Комплектные шинопроводы цеховых электрических сетей (*выпуск 53*)

Севастьянов М. И., Прокладка кабелей напряжением до 35 кв в промышленных и гражданских зданиях (*выпуск 54*)

Шувалов К. И., Простейшие схемы автоматического управления электроприводами (*выпуск 55*)

Ключев С. А., Осветительные сети производственных помещений (*выпуск 56*)

Ашкенази Г. И. и Холмянский Р. М., Электрооборудование театрально-зрелищных зданий (*выпуск 57*)

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

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

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

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

Готовятся к печати

Злобин Б. В., Испытания силовых трансформаторов при монтаже

Каетанович М. М., Как работают провода, изоляторы и арматура линии электропередачи

Мусаэлян Э. С., Проверка и испытание синхронных генераторов в процессе монтажа

Рубо Л. Г., Изоляционные лаки и их применение

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
51	2 сверху	74,5a	72,5a
90	Табл. 1-1 Головка	Индуктивность, мкГН	Индуктивность, мГН
93	16 сверху	$P = P \frac{s}{s_H}$	$P = P_H \frac{s}{s_H}$

ИСПРАВЛЕНИЯ

- 52 На рис. 22 рассоединить концы от I_2 и от правых зажимов амперметров и соединить каждый из I_2 со своим амперметром.
- 91 В табл. 1-1 для серии Д-522 индуктивность дана в миллигенри.

150р.
Цена 19 коп.