

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ В
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ РАБОТЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.*Р. А. Воронов.*

I.

При работе современных электрических установок большое внимание уделяется значению коэффициента мощности, от которого зависит не только степень использования генераторов, трансформаторов и электрических сетей, но также и сама стоимость вырабатываемой электроэнергии. Электрические станции заинтересованы в том, чтобы их энергия потреблялась при возможно большем коэффициенте мощности, для чего у потребителей должно быть хорошее оборудование, соответствующее месту своей работы.

Главное влияние на величину коэффициента мощности оказывают электромоторы, работающие при неполной нагрузке или при повышенном напряжении. Несколько меньшее влияние оказывают трансформаторы и другие индукционные аппараты. Правильный подбор оборудования и рациональный выбор компенсационных устройств, а также систематическое наблюдение за их работой, может очень сильно повысить значение общего коэффициента мощности всей сети.

Для того, чтобы потребители стремились к проведению мероприятий по улучшению коэффициента мощности своих установок, была введена система штрафного тарифа, при которой сверх платы за электроэнергию, при плохом коэффициенте мощности, накладывался штраф, зависящий от величины этого коэффициента. В связи с этим у потребителей рядом со счетчиками активной энергии появились счетчики реактивной энергии, по которым и рассчитывается значение среднего коэффициента мощности.

Рациональный подбор оборудования может быть произведен только на основании систематических наблюдений за всеми объектами оборудования и выявлению тех из них, которые оказывают наибольшее влияние на ухудшение коэффициента мощности. При производстве таких обследований и наблюдений получались большие затруднения в связи с отсутствием подходящих приборов и невозможностью иметь их включенными заранее во всех местах сети, где они потребуются. Иметь комплекты переносных приборов и переносить их из одного места в другое также оказалось неудобным, причем в некоторых случаях такое включение приборов вообще оказывается невозможным. Необходимо было найти такие методы измерений, при которых можно было бы обходиться минимальным количеством наиболее простых приборов или имеющихся уже на месте, или легко включаемых в сеть, причем точность измерений должна быть вполне достаточной.

Таким способом явился, предложенный еще в 1933 году автором этой работы, метод одного амперметра, пригодный для симметричных трехфазных цепей¹⁾. Этот способ, примененный на некоторых установках, показал

¹⁾ Известия СММИ 1934 г. № 2. г. Томск.

полную свою пригодность и оказался достаточно удобным, но был ограничен в своем применении мощностью обследуемой цепи. Дальнейшая обработка этого метода привела к небольшим переделкам амперметра или трансформатора тока и дала возможность применять его при любых мощностях и в любых цепях.

Настоящая работа посвящена теории этого метода и описанию способов его практического использования.

II.

Коэффициентом мощности принято называть тот множитель, на который необходимо помножить произведение напряжения и тока для того, чтобы получить мощность этой цепи. В обычных цепях при синусоидальном токе этот коэффициент равен косинусу угла сдвига фаз тока и напряжения и определяется из соотношения

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}$$

при однофазном токе, или

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}$$

при симметричном трехфазном токе. Наиболее распространенным методом является вычисление коэффициента мощности по этим уравнениям, для чего необходимо точное измерение мощности, напряжения и тока.

Для таких измерений необходимо иметь в цепи три прибора: вольтметр, амперметр и ваттметр, пределы измерений которых должны соответствовать условиям работы данной цепи. В трехфазных цепях может потребоваться при отсутствии нулевой точки специальный ваттметр, или же придется применить схему Арона с двумя ваттметрами. Так как ошибки приборов могут суммироваться, то для получения хороших результатов надо все приборы иметь достаточно точные. Если взять обычные технические приборы, то общая ошибка результата может достигнуть 6% (считая до 2% на прибор), вероятное же значение ее может быть около 4%. Если приборы будут работать не в конце шкалы, а в середине или начале таковой, то эта ошибка может возрасти еще больше. Только используя точные приборы класса Л или К, можно иметь результаты с достаточной точностью порядка 1—1,5%.

Так как объекты измерений могут иметь самые различные мощности, то эти приборы потребуются с различными же пределами измерений. Установить их заранее во всех местах не представляется возможным, включение же амперметра и ваттметра во время работы невозможно и обычно может быть произведено лишь при выключенной цепи, что также во многих случаях не может быть выполнено.

Применение фазометра уменьшает количество необходимых приборов и упрощает наблюдение, но его включение во время работы цепи встречает те же затруднения, как и включение ваттметра. Показание фазометров имеет достаточную точность при нормальных условиях их работы, но при всех отклонениях от них (малый ток или малое напряжение, несинусоидальность тока, неправильная частота, несимметрия фаз и т. д.) приводит часто к большим погрешностям. Кроме того, хорошие фазометры очень дороги и редко имеются на месте, простые же электромагнитные очень мало надежны. Наконец, фазометр дает неполные наблюдения и требует дополнительного включения амперметров или ваттметров.

При наличии двух одинаковых ваттметров (или при возможности осуществления переключения обмоток одного из них) можно в трехфазном

токе использовать схему Арона. При этом для симметричной системы угол сдвига фаз найдется из уравнения

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2},$$

где P_1 и P_2 показания приборов. По углу сдвига фаз легко может быть найден и коэффициент мощности. Вместо ваттметров могут быть использованы счетчики, при которых в уравнение вместо показаний ваттметров придется вставить число оборотов дисков за одно и то же время.

Этот способ из-за необходимости иметь два одинаковых прибора употребляется обычно лишь в условиях лабораторных испытаний или же в тех случаях, когда приборы имеются включенными в данном месте на постоянную работу. Кроме того, для получения результатов с достаточной точностью надо иметь вполне симметричные фазы как по напряжению, так и по нагрузке.

Использование этих способов измерений коэффициента мощности связано с необходимостью иметь точные приборы, которые приходится по мере необходимости переносить из одного места в другое. Все это значительно упростилось бы, если бы можно было токовые обмотки приборов включать через трансформаторы тока с раздвижным сердечником (типа щипцов Дитца). К сожалению, точность таких трансформаторов, особенно в части угловой погрешности, столь мала, что доверять показаниям ваттметра или фазометра при включении через них нет никакой возможности, причем нельзя даже ввести какие-либо поправки в их показания.

Из указанного выше следует, что обычно применяемые методы мало удобны и не могут быть использованы очень широко.

III.

Для нахождения коэффициента мощности в синусоидальном токе необходимо тем или иным путем установить значение угла сдвига фаз между током и напряжением и взять косинус этого угла. Наибольший интерес по простоте примененных приборов представляет метод трех амперметров, предложенный Флемингом, в котором используется свойство векторов трех токов, из которых один является суммой двух других.

По этому способу, параллельно нагрузке, коэффициент мощности которой желают определить, включается сопротивление, имеющее вполне определенный сдвиг фаз. Обычно это сопротивление выбирается активным, у которого ток совпадает по фазе с напряжением сети. Тремя амперметрами производится измерение тока в нагрузке I_1 , тока в дополнительном сопротивлении I_2 и общего тока I_3 . Из векторной диаграммы легко получить значение коэффициента мощности нагрузки

$$\cos \varphi = \frac{I_3^2 - I_1^2 - I_2^2}{2 I_1 I_2}.$$

Для получения достаточной точности по этому методу необходимо иметь ток в добавочном сопротивлении того же порядка, что и в нагрузке, для которой производятся измерения, причем сами приборы должны давать возможно меньшие ошибки. Из-за наличия в уравнении разностей, уже небольшие отклонения в показаниях могут дать значительные ошибки в результате.

Из-за этих неточностей и из-за необходимости иметь в цепи три амперметра, этот способ практического применения почти не получил. Тем не менее несколько лет назад появилось предложение применять этот

способ не только в однофазной цепи, но и в трехфазной¹⁾. Так как в этом способе, сверх указанных выше неудобств, требуется включать в сеть звездой три одинаковых ваттных сопротивления, потребляющих мощность такую же, как и обследуемая нагрузка, применение его едва ли может быть оправдано.

Метод трех вольтметров, являющийся по существу видоизменением метода трех амперметров, был предложен Айртоном, Сумпнером и Свинбурном одновременно с Флемингом (1891 г.). Замена амперметров вольтметрами дает возможность обойтись только одним прибором, переключаемым в три места, что несколько повышает точность. Необходимость включения последовательно сопротивления требует почти двойного повышения напряжения сети, что совершенно невозможно в условиях эксплуатации. Поэтому этот метод применим еще реже, чем метод трех амперметров.

Описываемый ниже метод по существу является также видоизменением способа Флеминга, но для него необходимо иметь только один измерительный прибор—амперметр, причем точность этого прибора имеет значительно меньшее влияние на величину коэффициента мощности, получаемого в результате измерения.

IV.

В простейшем виде метод одного амперметра был рассчитан на определение коэффициента мощности у трехфазных асинхронных моторов небольшой мощности или у других соответствующих им нагрузках с симметричными фазами. Используя имеющийся в цепи обычный технический амперметр, или включая таковой в одну из фаз, если его не было²⁾, производят три отсчета по этому прибору в соответствии со схемой рисунка 1. Первый отсчет I_1 берется при нормальной работе цепи, второй отсчет I_2 при добавочном включении сопротивления R между этой фазой и второй, и третий I_3 при переключении этого же сопротивления в третью фазу.

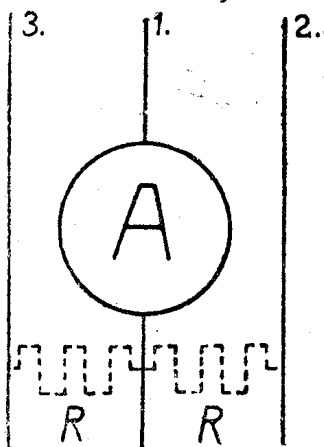


Рис. 1.

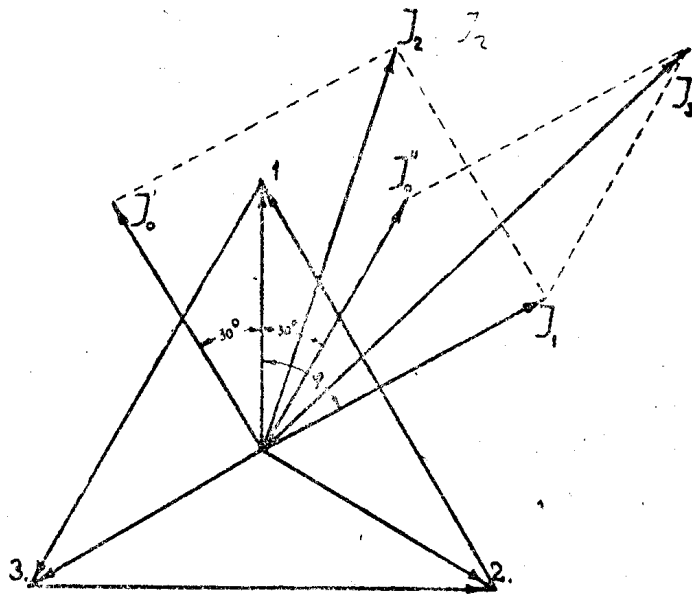


Рис. 2.

В качестве сопротивления могут быть взяты лампы накаливания в соответствующем количестве или какой-либо проволочный реостат с малой индуктивностью.

Этих трех отсчетов достаточно для того, чтобы найти угол сдвига фаз, а следовательно, и коэффициент мощности. Три значения I_1 , I_2 и I_3

¹⁾ Горохов. Определение коэффициента мощности асинхронных моторов малой мощности при отсутствии ваттметра. Электричество. 1933 г.

²⁾ Для этой цели могут быть взяты щипцы Дитца, если нет возможности включить обычный амперметр.

соответствуют длинам векторов диаграммы рисунка 2, причем векторы I_0' и I_0'' соответствуют токам в сопротивлении R при его двух включениях. Последние два вектора находятся в фазе с линейными напряжениями, т. е. имеют сдвиги на 30° от фазового напряжения.

Из диаграммы имеем

$$\begin{aligned} I_2^2 &= I_1^2 + I_0^2 + 2 I_1 I_0 \cos(\varphi + 30^\circ) = I_1^2 + I_0^2 + I_1 I_0 (\sqrt{3} \cos \varphi - \sin \varphi), \\ I_3^2 &= I_1^2 + I_0^2 + 2 I_1 I_0 \cos(\varphi - 30^\circ) = I_1^2 + I_0^2 + I_1 I_0 (\sqrt{3} \cos \varphi + \sin \varphi). \end{aligned} \quad (a)$$

Так как значения I_1 , I_2 и I_3 известны по показаниям приборов, то неизвестными являются только ток I_0 и угол φ . Путем ряда преобразований можно найти значение тока

$$I_0 = \sqrt{A - \sqrt{A^2 - B^2}},$$

где A и B заменяют выражения

$$\begin{aligned} 2A &= I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 \\ B^2 &= (I_1^4 + I_2^4 + I_3^4) - (I_1^2 I_2^2 + I_1^2 I_3^2 + I_2^2 I_3^2); \end{aligned}$$

подставляя это значение I_0 в уравнение, найдем искомую величину коэффициента мощности

$$\cos \varphi = \frac{I_3^2 + I_2^2 - 2I_1^2 - 2I_0^2}{2\sqrt{3} I_1 I_0} = \frac{2\sqrt{A^2 - B^2} - 3I_1^2}{2\sqrt{3} I_1 \sqrt{A - \sqrt{A^2 - B^2}}}.$$

Это уравнение оказывается очень сложным для вычисления, причем ввиду ряда разностей, входящих в него, оно может дать большие неточ-

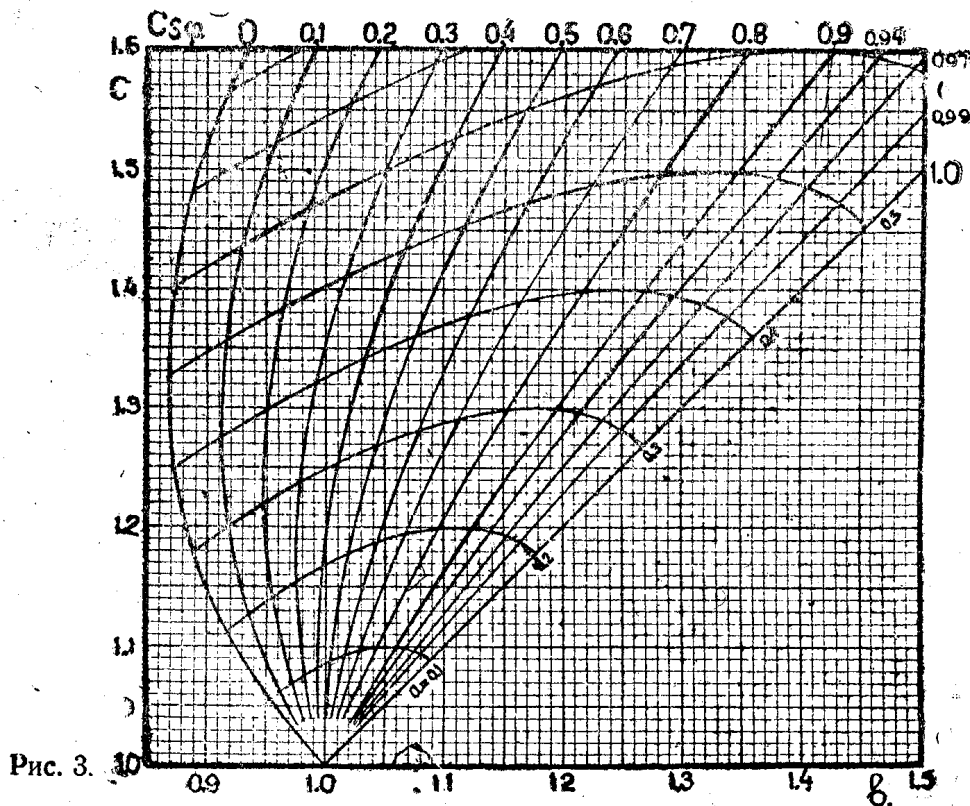


Рис. 3.

ности в результате вычисления. Пользование им оказывается очень утомительным и требует много времени.

В связи с этим гораздо удобнее вместо вычисления пользоваться заранее построенной номограммой, приведенной на рисунке 3. Вводя отношения токов

$$\frac{I_0}{I_1} = a; \quad \frac{I_2}{I_1} = b; \quad \frac{I_3}{I_1} = c,$$

получаем уравнения (а) в следующем виде

$$b^2 = 1 + a^2 + 2a \cos(\varphi + 30^\circ),$$

$$c^2 = 1 + a^2 + 2a \cos(\varphi - 30^\circ).$$

Задаваясь различными значениями для a и φ , по этим уравнениям можно вычислить соответствующие значения b и c . Используя последние величины как оси координат, легко построить семейство кривых для $\cos \varphi$ и для a .

Пользование номограммой очень просто. Для этого по отсчетам по амперметру вычисляется значение отношений b и c и по ним находится точка номограммы. По этой точке легко определить не только значение коэффициента мощности, но также и соответствующее отношение $a = \frac{I_0}{I_1}$,

а следовательно, и ток I_0 , проходивший в добавочном сопротивлении.

Исследование вопроса о возможных ошибках показало, что источником их могут быть непропорциональность шкалы амперметра проходящему току, малая чувствительность прибора и несимметрия напряжений сети. Точность прибора при этом не играет никакой роли, так как на окончательный результат влияют не сами токи, а их отношения.

Для получения лучшей чувствительности прибора необходимо, чтобы нормальный ток цепи соответствовал 50—75% номинального значения шкалы. При включении добавочного сопротивления показания не должны выходить за пределы шкалы (25% и 100%) и в то же время хотя бы одно из них должно возможно больше отличаться от показания при нормальном токе.

Рассматривая номограмму (рис. 3), можно прийти к заключению, что наиболее удобным добавочным сопротивлением является такое, при котором отношение a будет лежать в пределах 0,4—0,6, что соответствует току I_0 в среднем около 50% от тока нагрузки. Учитывая возможность получения таких токов в переносных ваттных сопротивлениях, было предложено, что пределом применения этого метода являются моторы с мощностями до 30—40 КВ при напряжениях сети до 380 вольт.

Использование этого метода на некоторых установках показало, что такая мощность не является еще пределом. По заявлению работников этих установок¹⁾ ими по данному методу производились измерения для моторов с мощностями до 100 КВ, правда при снижении тока I_0 до 25—30% от тока нагрузки. Так как результаты вполне удовлетворяли их, то они предполагали распространить этот метод на еще более мощные установки.

Несимметрия напряжений в нормальной цепи трехфазного тока очень невелика и ее влияние почти незаметно, но при применении этого метода, из-за включения добавочного сопротивления в одну фазу, могут получиться дополнительные падения напряжения заметной величины. Подсчеты показывают, что, несмотря на это, значения коэффициента мощности будут отличаться от истинных значений очень мало. Даже в сетях с большим сопротивлением проводов ошибка будет получаться только в сотых долях, и то лишь при больших углах сдвига фаз.

Некоторую помощь в исправлении этого влияния несимметрии напряжений могут оказать металлические лампы накаливания, если их применять вместо сопротивления R . Так как сопротивление ламп возрастает с накалом, то их ток будет изменяться значительно медленнее, чем изменится напряжение, а следовательно, и разница в токах при двух включениях будет меньшая.

1) Анжерская ЦЭС.

Как видно из приведенного описания метода одного амперметра, такой имеет преимущества перед другими способами измерения коэффициента мощности, не требуя дополнительного включения точных приборов, а обходясь простым техническим амперметром или щипцами Дитца. Точность результатов, получаемая при этом, оказывается вполне хорошая, почти не отличающаяся от результатов измерений по контрольным приборам (ошибка в результатах обычно не превосходит 0,02—0,03).

В то же время этот способ при больших мощностях оказывается довольно громоздким, так как требует большого реостата для сопротивления R , а также создает на время измерения дополнительную загрузку сети с потреблением значительной мощности. Кроме того, этот способ оказался неприменим к однофазным цепям.

Дальнейшее развитие этого способа дало возможность устранить все недостатки и распространить его применение на любые мощности и любые цепи переменного тока.

V.

Всякий амперметр электромагнитной системы дает отклонение, зависящее от общих ампервитков, создаваемых его обмоткой. Вид шкалы при этом зависит от очень многих факторов: размеры катушки и ее расположение, форма железного сердечника, наличие и расположение неподвижных железных частей и т. д. В том числе на шкалу оказывает влияние и расположение обмотки на катушке.

Шкала прибора может быть отградуирована или непосредственно на ток, проходящий через прибор, или на кратный ему, как это имеет место при применении трансформаторов тока.

Если на катушке такого амперметра поместить две совершенно одинаковых обмотки с одинаковым же расположением витков, то показания прибора должны соответствовать току любой из катушек, т. е. шкалы для них должны совпасть между собой. Добиться такого расположения обмоток очень легко, так как для этого достаточно обе обмотки мотать одновременно сразу двумя проводами.

При одновременном прохождении токов по обеим обмоткам прибора, показания такого будут зависеть от геометрической суммы ампервитков

$$I_1 W_1 + I_0 W_0 = (I_1 + I_0) W_1$$

или, так как витки одинаковы, от суммы токов. Иначе говоря, амперметр будет показывать геометрическую сумму токов даже в том случае, когда в действительности таковой в цепи нет.

Проверить правильность такого соотношения при любых сдвигах между токами можно по схеме, приведенной на рис. 4.

Такой амперметр может быть использован вместо простого для нахождения коэффициента мощности симметричной трехфазной цепи, причем схема получает вид, приведенный на рис. 5. Одна из обмоток, рассчитанная на длительное прохождение тока, включается в главную цепь и работает как обычный амперметр, вторая же, могущая быть выполненной из значительно более тонкой проволоки, служит для пропускания тока добавочного сопротивления. Весь порядок измерения и дальнейшего определения $\cos \varphi$ остается такой же, как и при простом амперметре.

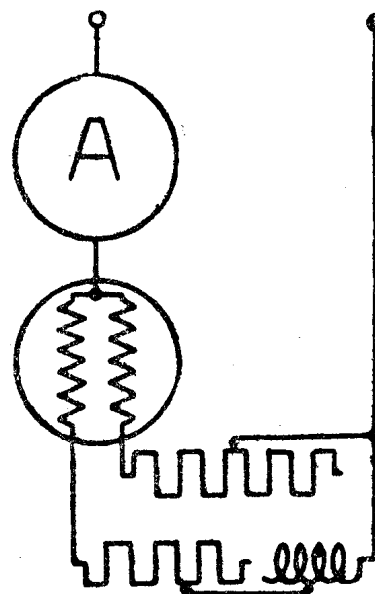


Рис. 4.

Легко видеть, что в этом случае никаких преимуществ перед простым прибором не получается, недостатки же имеются, так как прибор несколько усложняется и могут получиться дополнительные ошибки за счет неполной идентичности шкал.

Этот прибор должен быть несколько видоизменен таким путем, чтобы ток I_0 мог быть взят во много раз меньше тока нагрузки, причем отношение a должно остаться прежним. Это можно достигнуть двумя путями—или неодинаковым числом витков в обмотках, или же включением в главную обмотку трансформатора тока.

Создать две обмотки на одном приборе с разным числом витков, но с одинаковым видом шкал (т. е. с пропорциональными показаниями) можно различными путями, причем наиболее простым является следующий. При одновременной обмотке обеих обмоток, главная мотается нормальным проводом, рассчитанным на длительную работу с полной нагрузкой. Вторая обмотка мотается сразу в m проводов тонкой проволоки, рассчитанной на кратковременное прохождение тока, равного примерно $(0,3—0,4)\frac{I}{m}$, где I —номинальный ток прибора.

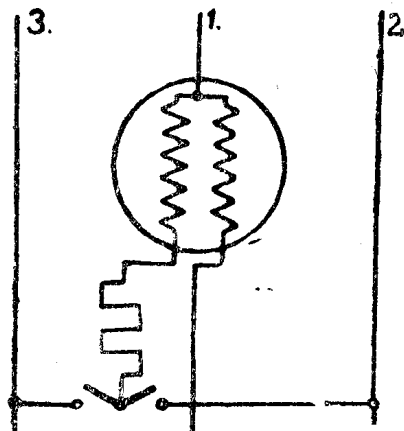


Рис. 5.

После намотки всех необходимых витков, отдельные проводники второй обмотки включаются последовательно, т. е. получается одна обмотка с числом витков в m раз больше, чем в главной. Ввиду одинакового расположения витков обеих обмоток шкалы получатся совершенно одинаковые, только цена деления для второй обмотки будет соответственно в m раз меньше.

При прохождении тока одновременно по обеим обмоткам показания прибора будут давать не просто сумму токов, а значение

$$I_1 + m I_0 = I_1 + I'_0,$$

т. е. сумму токов, приведенных к виткам первой обмотки. Это дает возможность создавать те же изменения в показаниях прибора при помощи тока I_0 в m раз меньше по величине, чем в случае простого амперметра.

При включении такого прибора по схеме рисунка 5 ток в сопротивлении R потребуется меньше в m раз, а следовательно, сопротивление может быть взято в m раз больше. Потребляемая мощность и получающееся в цепи дополнительное падение напряжения также уменьшатся в m раз.

Теоретически при таком приборе измерения могут производиться для любых мощностей, так как значение m может быть выбрано сколь угодно велико. В действительности, из-за трудности изготовления такого прибора на большую силу тока, при больших мощностях приходится применять вторую схему с трансформатором тока (см. ниже).

VI.

Выполнение двухобмоточного прибора обычно не встречает никаких затруднений, так как у имеющихся конструкций на катушке всегда есть большой запас места, дополнительная же обмотка, будучи тонкой, занимает места очень мало. Даже кустарная переделка прибора обходится очень дешево, при заводском же изготовлении разницы в стоимости простого и двухобмоточного амперметров не должно быть почти совсем. Все усложнение прибора кроме этой обмотки будет заключаться в одном до-

полнительном выводе для трехфазного тока или в двух для однофазного (см. ниже).

Вместо добавочного сопротивления с успехом могут применяться лампы накаливания, которые, как указывалось выше, несколько уменьшают неточности, получаемые из-за несимметрии напряжений. Вся установка получает вид, изображенный на фотографии рисунка 6. Двухобмоточный амперметр включен в обычную схему трехфазного тока. При измерении коэффициента мощности к его дополнительному выводу присоединяется добавочное сопротивление, состоящее из нескольких металлических ламп накаливания различной мощности (чтобы можно было подбирать ток I_0), которые через переключатель присоединены к двум остальным фазам.

По миновании надобности лампы вместе с переключателем переносятся в другое место, прибор же продолжает работать как обычный амперметр.

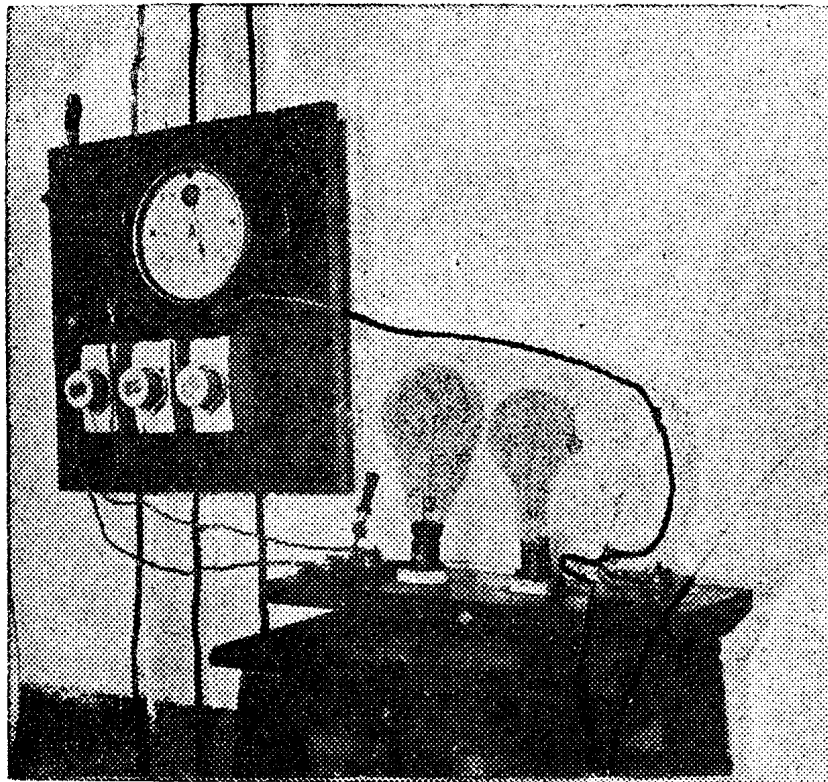


Рис. 6.

Все присоединение ламп и производство измерения занимает одну-две минуты.

Практика показала, что изготовление такого прибора удобно лишь для токов до 100—150 ампер, при токе в дополнительной обмотке порядка 5 ампер и множителе m до 10. Это дает возможность с реостатом, потребляющим около 5 ампер, производить измерение коэффициента мощности у моторов до 70—100 киловатт при напряжениях до 380 вольт.

VII.

В настоящее время часто вместо многоамперного прибора применяют амперметр всего лишь на 5 ампер, включая его в сеть через измерительный трансформатор тока. Так как такое включение значительно упрощает и удешевляет измерительный прибор и схему подводки тока к нему, стоимость же трансформатора очень невелика, эти схемы получили распространение даже на низком напряжении.

При использовании такой схемы для двухобмоточного амперметра, у последнего могут быть взяты обе обмотки на 5 ампер, отличаясь лишь

толщиной провода. Изготовление такого амперметра, конечно, гораздо проще, чем многоамперного с различным числом витков обмоток.

Схема включения при таком приборе получает вид, изображенный на рисунке 7, причем, во избежание пробоя изоляции между обмотками прибора, таковые должны быть обязательно соединены друг с другом электрически, что вызывает также соединение обеих обмоток трансформатора.

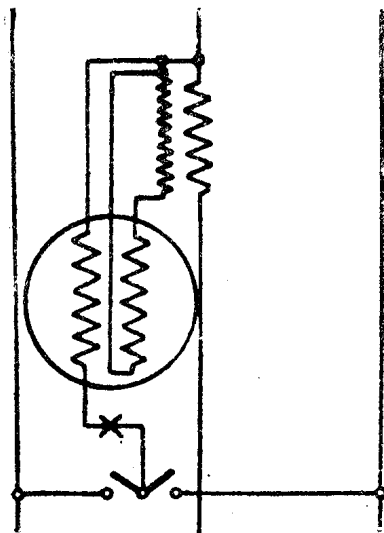


Рис. 7.

ком в главной обмотке до 5 ампер и в добавочной—до 2—3 ампер. Дополнительным сопротивлением по всех случаях могут служить металлические лампы накаливания. При 220 вольтах удобно иметь три лампы, одну в 100 ватт, вторую в 200 и третью в 300 ватт. При помощи этих ламп можно всегда подобрать нужный добавочный ток.

VIII.

При применении трансформатора тока можно, вместо нанесения второй обмотки на катушку амперметра, намотать третью обмотку на самом трансформаторе тока, а амперметр взять самый обычный. Такая схема, не отличаясь в основном от предыдущих, имеет ряд весьма существенных преимуществ.

Для трехобмоточного трансформатора тока должно существовать равенство ампервитков

$$I_1 w_1 + I_0 w_0 + I_2 w_2 = I_0 w_1,$$

где I_0 — ток в добавочной обмотке, а I_0 — намагничивающая составляющая тока общих ампервитков, отнесенная к главной первичной обмотке. Если пересчитать все токи на число витков этой обмотки, то уравнение для приведенных токов примет вид

$$I_1 + I_0' + I_2 = I_0,$$

откуда ток, проходящий через амперметр, будет

$$-I_2 = (I_1 + I_0') - I_0;$$

расположение этих токов на векторной диаграмме показано на рисунке 8.

В трансформаторах тока нормального типа намагничивающая составляющая I_0 очень невелика и ею можно пренебречь, тем более, что угловая

погрешность для I_2 в этом случае не играет никакого значения. Кроме того, эта составляющая, будучи пропорциональной току I_2 ¹⁾, будет влиять на показания прибора одинаковым образом во всех случаях, так что отношения токов не изменятся. Это дает возможность считать показания амперметра равным сумме токов

$$I_1 = I'_0 = I_1 + mI_0 = I_1 + \frac{\omega_0}{\omega_1} I_0$$

без каких либо погрешностей.

Схема для измерения коэффициента мощности в цепи трехфазного тока при применении такого трехобмоточного трансформатора получает вид, изображенный на рисунке 9. Выбирая число витков добавочной обмотки одинаковым с числом витков вторичной обмотки, можно применять в качестве сопротивления те же лампы, что и в предыдущих случаях.

Эта схема интересна тем, что в ней исключаются угловые погрешности трансформатора тока и нет необходимости в соединении между обмотками. Это дает возможность применять такую схему при любых мощностях, причем напряжение может быть довольно значительным. В лабораторных условиях при принятии некоторых мер предосторожности (переключение провода длинной изолированной штангой, хорошая изоляция обмоток, заземление амперметра и малый ток в добавочной обмотке порядка 0,5 ампера) этой схемой оказалось возможным пользоваться даже при напряжениях в 2—3 тысячи вольт. На производстве пределом напряжения, вероятно, придется считать 500 вольт.

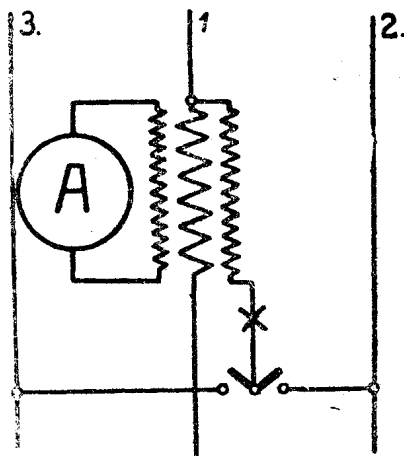


Рис. 9.

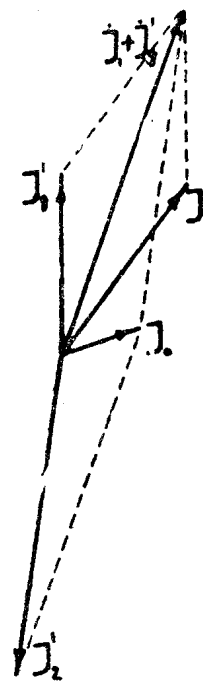


Рис. 8.

IX.

Как указывалось выше, переносные трансформаторы тока типа щипцов Дитца не могут быть применены для измерений ваттметрами и фазометрами как вследствие больших угловых погрешностей, так и из-за неполной пропорциональности между токами первичной и вторичной цепи. Причиной этого является малое число ампервитков первичной цепи (проходной одновитковый трансформатор с малым первичным током), следствием чего получается большая намагничивающая составляющая тока. Кроме того, из-за раздвижного сердечника и нежесткого расположения первичного провода по отношению к этому сердечнику, получают значительные рассеяния магнитных потоков, неодинаковые при различных условиях работы щипцов.

Тем не менее при небольшой доделке эти щипцы могут быть использованы для измерения $\cos\varphi$ по указанному выше методу. Для этого необходимо нанести на них еще одну обмотку, имеющую m витков и расположенную поверх вторичной обмотки. В этом случае также получается трехобмоточный трансформатор, но несколько отличный от обычного.

1) См. нижеследующий раздел.

При работе такого трансформатора общий магнитный поток, создающий электродвижущую силу вторичной обмотки, складывается геометрически из трех частей

$$\Phi_0 = \Phi + \Phi_a + \Phi_b.$$

Составляющая потока Φ (рис. 10) является общей для всех трех обмоток и пропорциональна геометрической сумме всех трех токов, взятых в приведенных значениях

$$\Phi = k(I_a + I'_b + I'_2),$$

где k — коэффициент пропорциональности, а I_a и I'_b — токи в двух первичных обмотках, главной и добавочной.

Составляющие Φ_a и Φ_b являются общими только для двух обмоток, одной из первичных и вторичной, причем для них в общем случае множители κ будут другими и неодинаковыми

$$\Phi_a = \kappa_a(I_a + I'_2),$$

$$\Phi_b = \kappa_b(I'_b + I'_2).$$

Составляющая потока, общая только для двух первичных обмоток, и потоки рассеяния каждой из них на соотношения работы трансформатора оказывать влияние не будут, вызывая лишь дополнительное падение напряжения в первичной цепи.

Общий магнитный поток должен создать электродвижущую силу, идущую на преодоление сопротивлений всей вторичной цепи, включая и реактансы рассеяния вторичной обмотки.

$$E_2' = -j4,44f\omega\Phi_0 = I'_2 Z_2';$$

подставляя в это уравнение значение Φ_0 , выраженное через токи обмоток, и преобразуя уравнение, получим

$$I'_2 = - \frac{I_a(\kappa + \kappa_a) + I'_b(\kappa + \kappa_b)}{\frac{z_2'}{4,44f\omega} + (\kappa + \kappa_a + \kappa_b)}.$$

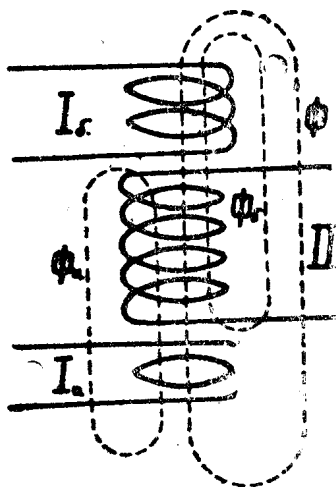


Рис. 10.

Из этого уравнения легко видеть, что ток I'_2 можно считать равным сумме токов I_a и I'_b только в том случае, когда потоки Φ_a и Φ_b (частичные рассеяния) малы по сравнению с потоком, охватывающим все три обмотки, и когда при этом мало влияние намагничивающего тока, т. е. члена с z_2' . Такое положение имеет место в нормальном трансформаторе тока, как это и было принято выше.

В случае щипцов Дитца или подобных им, рассеяния получают заметную величину и коэффициенты κ , κ_a и κ_b становятся соизмеримыми друг с другом. Это нарушает равенство токов, но все же при этом сохраняется некоторая пропорциональность между ними. Если ввести соотношение

$$\frac{\kappa + \kappa_b}{\kappa + \kappa_a} = \alpha,$$

то уравнение может быть приведено к следующему виду

$$I'_2 = -\beta(I_a + \alpha I'_b),$$

где коэффициент пропорциональности β объединяет все оставшиеся члены уравнения

$$\beta = \frac{\kappa + \kappa_a}{\kappa + \kappa_a + \kappa_b - j \frac{z'_2}{4,44f\omega}}$$

Так как амперметр для таких трансформаторов делается вполне определенным и обычно не употребляется в других местах, он может быть уже заранее отградуирован не на величину приведенного вторичного тока I_2 , а на несколько большую ($W_1 = 1$)

$$\frac{I_2}{\beta} = \frac{I_2 \omega_2}{\beta \omega_1} = I_2 \frac{\omega_2}{\beta},$$

как это обычно и делается.

Шкала для тока дополнительной обмотки будет отличаться от шкалы для тока первичной обмотки (провода) в $m\alpha$ раз, т. е. также не будет соответствовать приведенным значениям. Только в случае подбора частичных рассеяний обмоток равными ($\kappa_a = \kappa_b$) множитель α будет равен единице и шкалы для приведенных значений сравниваются между собой.

Применение щипцов для целей измерения коэффициента мощности ничем не отличается от указанного выше для трехобмоточного трансформатора тока. На рисунке 11 три первых положения дают необходимые измерения, по которым находятся отношения b и c , а по последним по номограмме определяется значение $\cos\varphi$. При этом ток в добавочном сопротивлении будет равен

$$I_0 = I_1 \frac{a}{m\alpha}.$$

Этот ток может быть легко измерен при четвертом положении рисунка II, когда добавочная обмотка включена, а щипцы сняты с провода.

Если при этом добавочное сопротивление R постоянно, то на приборе может быть нанесена шкала напряжений

$$U = I_0 R = I_1 \frac{R\alpha}{m\alpha},$$

т. е. эти же щипцы могут служить одновременно и вольтметром.

Из всего сказанного следует, что применение щипцов Дитца или подобных им трансформаторов тока значительно упрощает все измерения, давая возможность производить включение во время работы во всех цепях. Из-за переменного значения рассеяния точность таких измерений будет, конечно, меньше, чем при других схемах, но это уменьшение очень невелико и не будет иметь существенного значения. К тому же постоянство рассеяний можно получить довольно хорошее, располагая провод по возможности в центре железа и не сдвигая щипцов во время производства всех трех отсчетов.

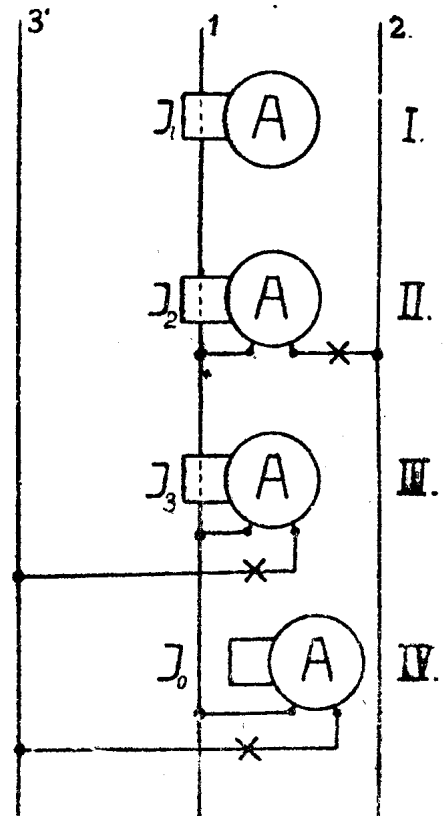


Рис. 11.

Ниже в таблице приведены данные измерений, произведенных одновременно четырьмя путями

	По амперметру, вольтметру, ваттметру и фазометру.		По двухобмоточному амперметру	По переделанным щипцами Дитца фирмы Гартман и Браун
	Контрольн. приборы	Техническ. приборы		
Измерение				
Напряжение	214	216	—	210
Ток	42,3	43	42	43
Мощность	8150	8030	—	—
Коэффициент мощности по фазометру	0,53	0,51	—	—
Вычисление				
Мощность	—	—	—	8120
Коэффициент мощности	0,52	0,50	0,53	0,52

Из этих значений видно, что результаты измерений по двухобмоточному амперметру и щипцам оказались очень близкими к результатам измерений по контрольным приборам, имея ошибки меньшие, чем по обычным техническим приборам.

X.

В указанных выше схемах с двухобмоточным амперметром или с трехобмоточным трансформатором тока соотношения векторов использовались одинаково с простейшим методом одного амперметра, причем во всех случаях результат находился по одной и той же номограмме рисунка 3. Кроме этого случая, могут иметься еще много других схем, преследующих несколько иные цели, имеющие другие уравнения и номограммы. Рассмотрим некоторые из них.

При применении дополнительной обмотки для измерения в трехфазной цепи можно переключить ее концы на обратное направление, т. е. получить разности токов, вместо сумм, как это изображено на диаграмме рис. 12. При этом имеем:

$$I_2^2 = I_1^2 + I_0^2 - 2I_1I_0 \cos(\varphi + 30^\circ),$$

$$I_3^2 = I_1^2 + I_0^2 - 2I_1I_0 \cos(\varphi - 30^\circ).$$

Вводя отношения токов, получаем

$$b^2 = 1 + a^2 - 2a \cos(\varphi + 30^\circ),$$

$$c^2 = 1 + a^2 - 2a \cos(\varphi - 30^\circ).$$

По этим уравнениям легко построить номограмму, аналогичную номограмме рис. 3, но такая оказывается гораздо менее удобной для использования, почему ее нет смысла применять.

В некоторых случаях, особенно при больших углах сдвига фаз, удобно производить при переключении добавочной цепи в другую фазу изменение направления тока в ней (рис. 13). Отсчеты I_2 и I_3 оказались бы при этом ближе друг к другу, что несколько повысило бы точность. Услож-

нение в пользовании такой схемой и могущие при этом получиться путаницы во включениях совершенно не оправдываются этим ничтожным повышением точности.

Подобные же номограммы могут быть построены для других добавочных сопротивлений (например, емкость или индуктивная катушка) или для другого порядка измерений. Так, например, применяя трехобмоточный

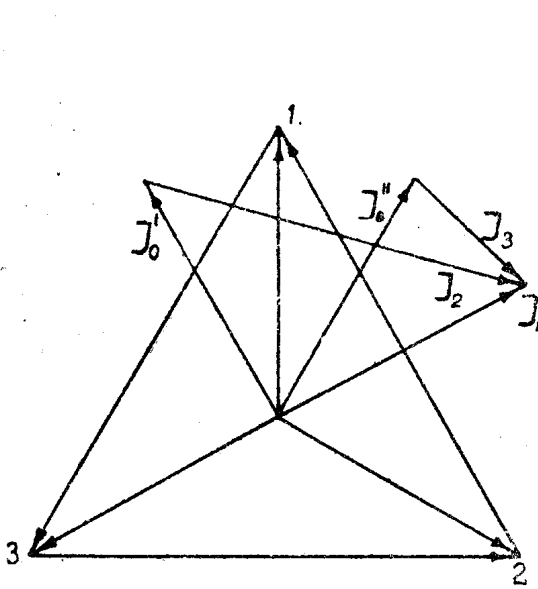


Рис. 12.

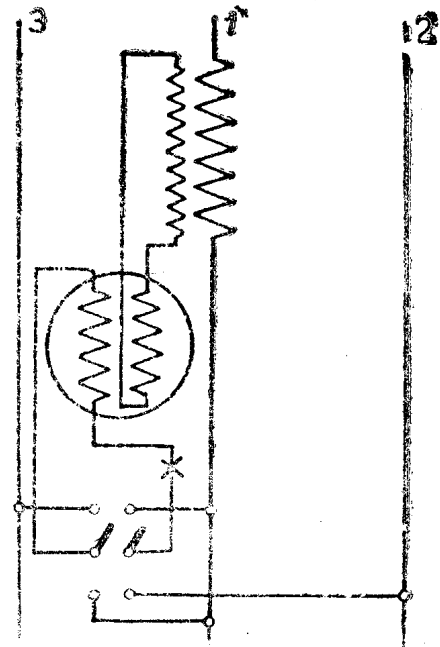


Рис. 13.

трансформатор тока, можно дополнительную обмотку включать не в ту же фазу, где измеряется ток, а в две других.

Применение всех этих схем показало, что они труднее выполнимы и менее удобны, чем описанные выше с ваттным добавочным сопротивлением.

XI.

Одним из применений трехобмоточных трансформаторов тока или двухобмоточных амперметров является измерение коэффициента мощности в однофазной цепи. При этом используются три отсчета по прибору: без добавочной обмотки, суммы токов и разности токов. Для получения последнего отсчета добавочную обмотку приходится переключать концами, для чего должно иметься два дополнительных вывода. Переключение может производиться или простым переносом концов, или же специальным двухполюсным переключением.

На рисунке 14 даны три схемы включения двухобмоточного амперметра при таком измерении. Показания прибора будут при этих включениях соответствовать векторам I_1 , I_2 и I_3 диаграммы рисунка 15. Обозначая через I_0 приведенное значение тока добавочной обмотки, имеем

$$I_2^2 = I_1^2 + I_0^2 + 2I_1I_0\cos(\varphi - \psi),$$

$$I_3^2 = I_1^2 + I_0^2 - 2I_1I_0\cos(\varphi - \psi),$$

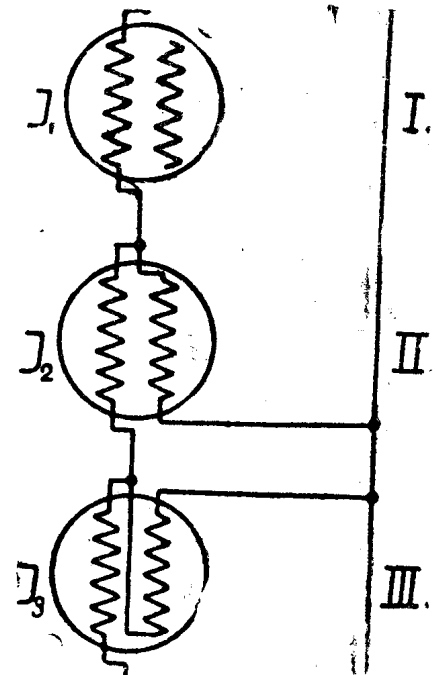


Рис. 14.

где ψ — угол сдвига фаз для тока в добавочной обмотке. Складывая эти уравнения, найдем

$$I_0^2 = \frac{1}{2} (I_2^2 + I_3^2 - 2I_1^2)$$

и, вычитая их одно из другого, получаем

$$\cos(\varphi - \psi) = \frac{I_2^2 - I_3^2}{4I_1 I_0}$$

подставляя в последнее значение I_0 , полученное выше, найдем уравнение

$$\cos(\varphi - \psi) = \frac{I_2^2 - I_3^2}{2\sqrt{2}I_1\sqrt{I_2^2 + I_3^2 - 2I_1^2}}$$

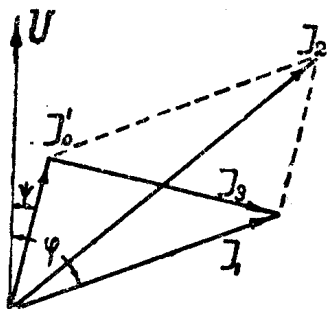


Рис. 15.

По этому уравнению может быть найден угол сдвига фаз φ , а по нему уже определен коэффициент мощности. Хотя это уравнение и проще, чем выведенное выше для трехфазного тока, но все-таки пользование им приводит к длинным вычислениям и может дать значительные ошибки.

В связи с этим для однофазной цепи также лучше строить номограмму и уже по ней определять значение коэффициента мощности.

Для построения такой номограммы введем прежние отношения токов, после подстановки которых уравнения принимают вид

$$b^2 = 1 + a^2 + 2a \cos(\varphi - \psi),$$

$$c^2 = 1 + a^2 - 2a \cos(\varphi - \psi);$$

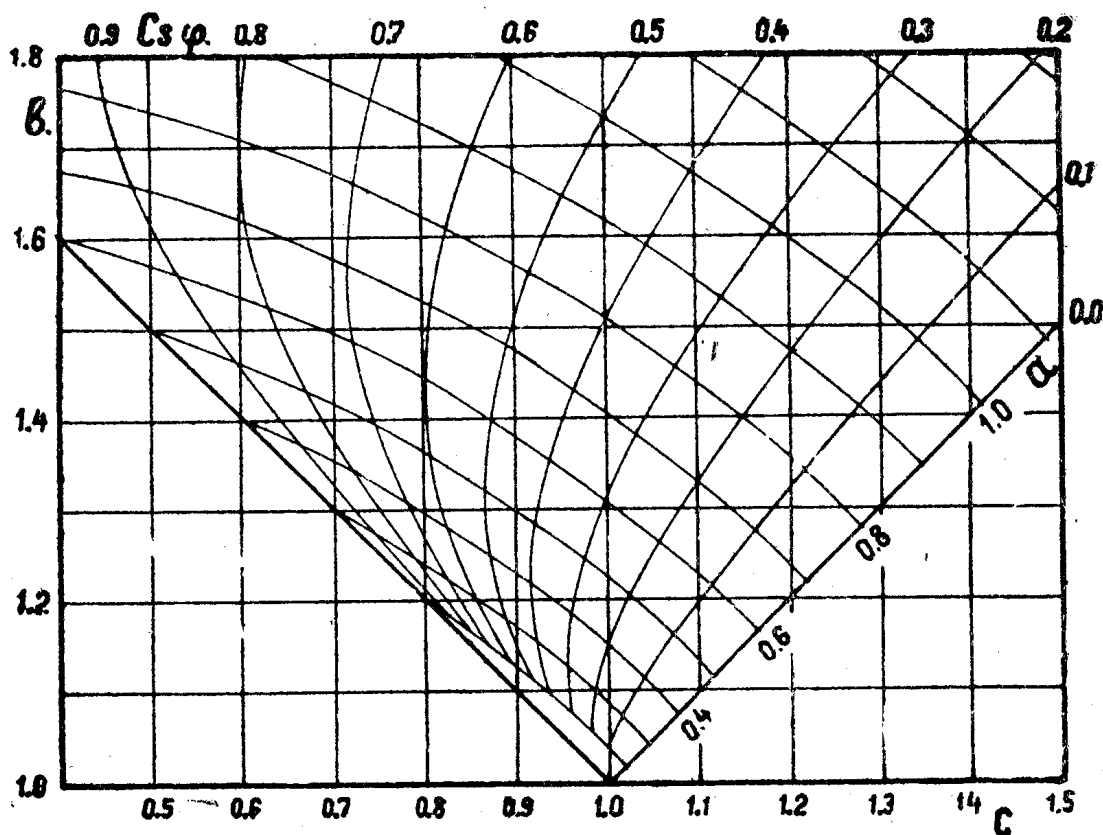


Рис. 16.

значения b и c , вычисленные для различных значений φ и a при ваттном добавочном сопротивлении ($\psi = 0$), приведены в таблице № 2, а соответствующая им номограмма дана на рисунке 16.

Так как шкала прибора обычно начинается с 20—25% ее крайнего значения, то при использовании этой номограммы трудно получить хорошие результаты при малых углах сдвига фаз, так как в этом случае один из отсчетов должен быть очень малым, а другой очень большим. При этом

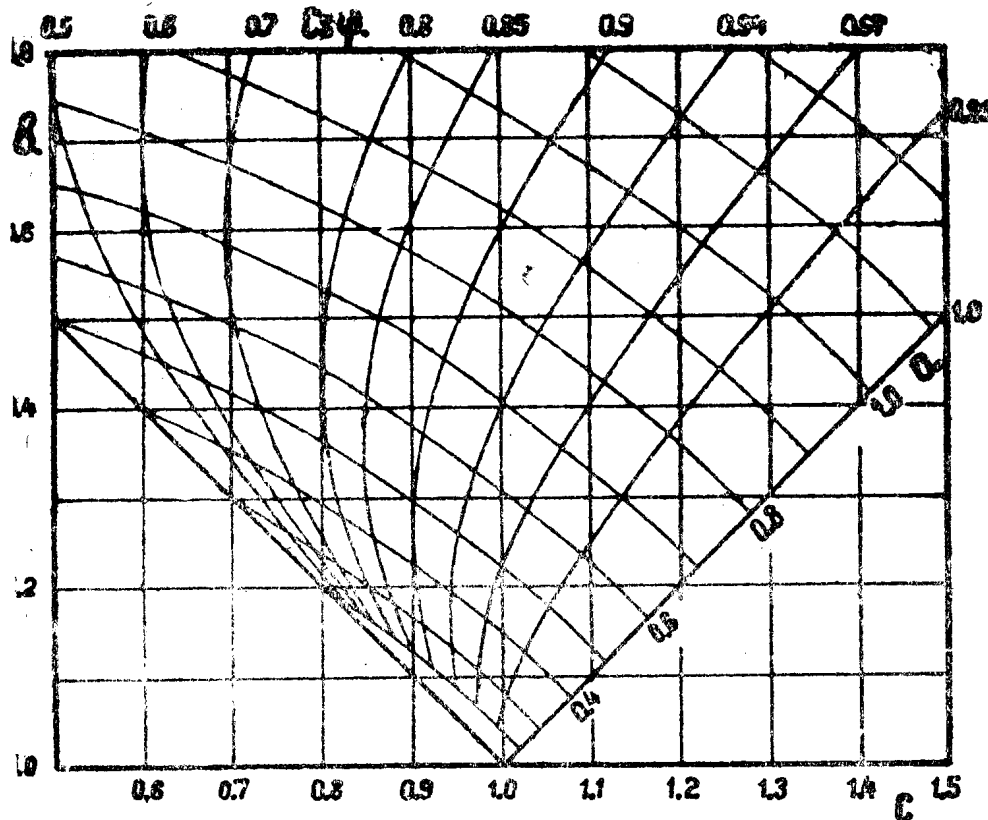


Рис. 17.

обычно нет возможности получить 40, значение a больше $-0,5$, что не дает достаточной точности результата.

Наоборот при больших углах сдвига фаз легко получить отсчеты для значений a больше $0,6—0,8$ при хорошей точности результата. Из таких соображений можно сделать заключение, что данная схема измерения и приведенная номограмма хороши только при таких углах сдвига, для которых коэффициент мощности меньше $0,7—0,8$.

На рисунке 17 дана номограмма, построенная для добавочного сопротивления в виде емкости без омического сопротивления, т. е. для значения угла $\psi = -90^\circ$. Легко видеть, что эта схема и номограмма наоборот лучше пригодны для малых углов сдвига фаз ($\cos \varphi$ больше $0,7—0,8$), чем для больших.

Номограммы рисунков 16 и 17 в одинаковой степени пригодны как для индуктивных нагрузок, так и для емкостных, только в последнем случае у второй номограммы значения b и c меняются местами. Если вместо добавочного сопротивления взять индуктивную катушку без железа, то из-за наличия омического сопротивления (при этом $\psi \neq 90^\circ$) кривые для индуктивной и емкостной нагрузки не совпадут между собой и их придется строить отдельно.

Схему рисунка 14 легко распространить и на случай применения трансформатора тока. Так, на рис. 18 дана схема постоянной установки с двух-

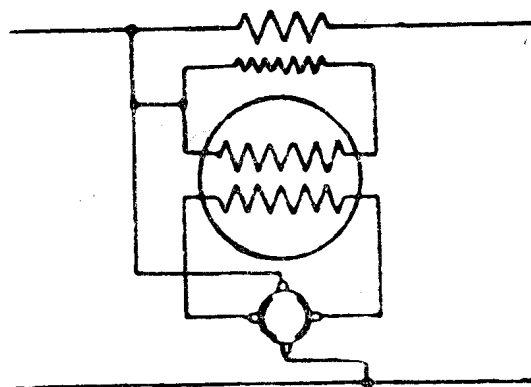


Рис. 18.

полюсным переключением. В обычном состоянии переключатель находится в таком положении, чтобы дополнительная обмотка была выключена. При измерении коэффициента мощности производится поочередное включение этой обмотки на прямой и обратный токи.

XII.

Одной из причин неточности результата, полученного этими способами, является влияние индуктивности катушек дополнительной цепи и взаимной индуктивности главной цепи на дополнительную. О возможности таких причин выше ничего не упоминалось, но вопрос о них может легко возникнуть. Выясним величину ошибок, могущих получиться в связи с этими влияниями.

Выше везде предполагалось, что в добавочной цепи включалось чистое активное сопротивление и что в связи с этим ток I_0 находился в фазе с напряжением. В действительности в этой цепи должно иметься также и индуктивное сопротивление в виде добавочной обмотки или амперметра или трансформатора тока, причем в последнем случае играет роль только индуктивность рассеяния.

Если принять, что в добавочной цепи ток в среднем должен быть равен 3 амперам, то добавочное сопротивление этой цепи будет равно 70 ом при 220 вольтах и 125 ом при 380 вольтах. В то же время катушки такого амперметра (20—40 витков со средним диаметром до 2—3 см) имеют индуктивность порядка 10^{-4} генри, что дает индуктивное сопротивление в сотых долях ома (0,03—0,08 ома). Сдвиг фаз в такой цепи будет измеряться несколькими минутами и никакого влияния на значение коэффициента мощности не окажет.

Подобным же образом ничтожно малое будет и влияние взаимной индуктивности катушек, т. к. электродвижущие силы взаимной индукции должны быть меньше, чем самоиндукции. Кроме того, взаимная индуктивность во многих случаях действует противоположно самоиндукции, т. е. они частично компенсируют друг друга.

При применении обычного типа трансформаторов тока, рассеяния обмоток получаются очень небольшими, почему их влияние будет также крайне мало. Только для трансформаторов типа щипцов Дитца оно могло бы быть сколько-нибудь заметным, но и то, по произведенным измерениям, разница в углах получается не свыше десятых долей градуса.

При уменьшении тока в добавочной обмотке и соответствующем увеличении ее числа витков (как для амперметра, так и для трансформатора) индуктивность начинает расти быстрее, чем сопротивление, что увеличивает угол ошибки. Из этого следует, что стремиться к очень малым токам в добавочной обмотке не следует.

XIII.

Подводя итоги всему сказанному выше, можно прийти к следующим выводам:

1. Метод одного амперметра требует значительно меньше и проще приборов, чем любой другой, причем точность результата определения коэффициента мощности достаточно большая и не уступает точности других методов.

2. В простейшем виде, используя простой технический амперметр, имеющийся в сети, этот метод может быть применен только для небольших мощностей.

3. При замене простого амперметра на двухобмоточный—удобство применения этого метода еще более возрастает, причем стоимость прибора

почти не увеличивается. Изменения могут производиться для любых мощностей.

4. Вместо двухобмоточного амперметра можно использовать простой, но с нанесением на трансформаторе тока добавочной третьей обмотки. Это дает возможность для целей измерения использовать трансформаторы тока по типу щипцов Дитца.

5. Применение дополнительной обмотки на амперметре или на трансформаторе дает возможность распространить этот метод и на цепи однофазного тока.

6. Величина добавочного сопротивления не имеет значения и может выбираться каждый раз такой, чтобы удобно было брать отсчеты. Это дает возможность вместо сопротивления использовать металлические лампы накаливания.

7. При любом измерении все вычисление может сводиться к нахождению двух отношений отсчетов по прибору и определению искомого коэффициента мощности по соответствующей номограмме.

Май 1937 года.