

ДОЦЕНТ Р. А. ВОРОНОВ.

ИЗМЕРЕНИЕ $\cos \varphi$ МЕТОДОМ ОДНОГО АМПЕРМЕТРА.

1.

Применяемые на практике методы измерения угла сдвига фаз φ и коэффициента мощности $\cos \varphi$ требуют включения различных приборов, встречающихся сравнительно редко. Чаще всего производятся измерения по ваттметрам, вольтметру и амперметру, коэффициент же мощности вычисляется по уравнению

$$\cos \varphi = \frac{P}{V \cdot J}$$

для однофазного тока и

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} V J}$$

для трехфазного с симметричной нагрузкой.

Реже используют показания двух ваттметров, включенных по схеме Арона, с вычислением по уравнению

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

с дальнейшим переходом к $\cos \varphi$. Еще реже (из-за дефицитности и дороговизны приборов) используются непосредственные отсчеты по фазометрам.

Помимо необходимости иметь точные приборы, часто отсутствующие там, где требуется произвести измерение $\cos \varphi$, их необходимо еще включать в сеть. При этом, для включения амперметровых обмоток приборов, требуется производить рассечку проводов, что в большинстве случаев, может быть выполнено только при выключенной сети.

В настоящее время, в связи с повсеместно проводимыми обследованиями установок с целью улучшения $\cos \varphi$, измерения последнего получают чрезвычайно большое значение. В виду массовости таких измерений и, часто, невозможностью выключать установки для присоединения приборов, производство измерений обычными способами сильно затруднено. Многие предприятия к тому же совсем не имеют нужных приборов, а потому лишены возможности проводить работу по обследованию коэффициента мощности.

Имея в виду, что наиболее распространенными приборами являются простые электромагнитные амперметры, включенные на предприятиях уже почти в всех установках, или же могущие быть легко установленными заранее во всех местах, где это потребуется, необходимо иметь такой способ измерения $\cos \varphi$, который использовал бы именно эти амперметры. Кроме того, из-за возможности расхождения в показаниях приборов, количество амперметров, необходимых для одного измерения, должно быть минимальным.

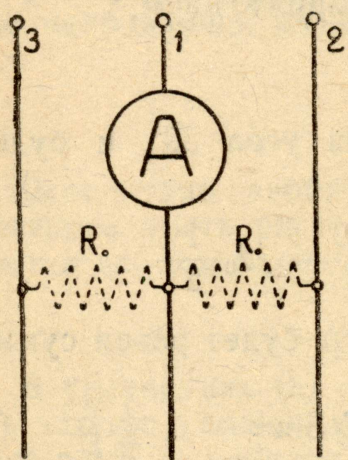
В настоящей статье дается описание нового метода измерения $\cos \varphi$ в цепях трехфазного тока, имеющего чрезвычайную простоту и требующего только одного самого простого амперметра. Этот амперметр может быть даже очень неправильным, лишь бы только его ошибки были приблизительно пропорциональны показанию.

При простоте применения этого метода измерений и достаточно точных результатах, можно предполагать, что он получит большое распространение в тех случаях, где не требуется большой точности.

2.

Предположим, что сеть трехфазного тока, изображенная на чертеже 1, имеет симметричные фазовые напряжения, что соответствует равенству линейных напряжений. Располагая на диаграмме (черт. 2) вектор фазового напряжения первой фазы вертикально, силу тока J_1 этой фазы, показываемую амперметром, можно представить в виде комплекса

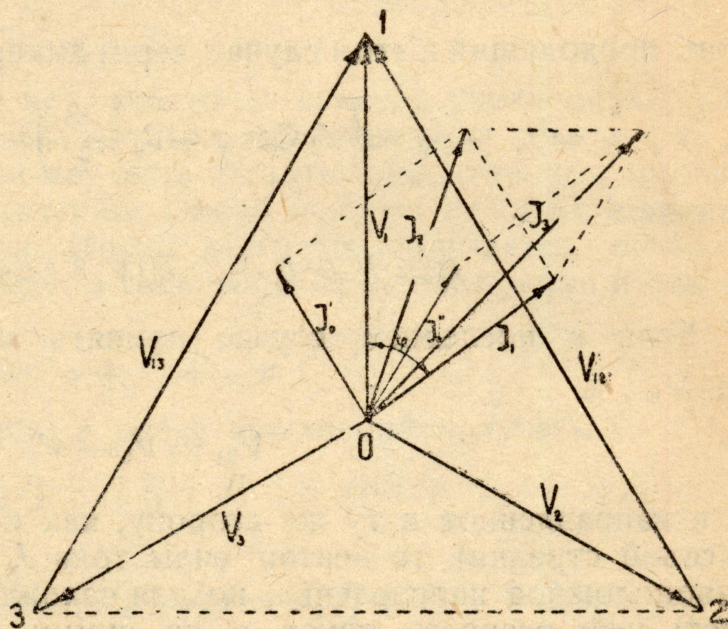
$$\dot{J}_1 = J_1 \cdot \cos \varphi - j J_1 \cdot \sin \varphi,$$



Чер. 1.

где φ — угол сдвига тока по отношению к фазовому напряжению, взятый положительным для индуктивной нагрузки.

Если теперь между проводами этой фазы и соседней (например, отстающей 2-й фазы) вставить



Чер. 2.

дополнительное омическое сопротивление R_0 , то показания амперметра изменятся, т. к. через него будет проходить и ток нагрузки и ток реостата. Последний ток будет находиться в фазе с линейным напряжением V_{12} и будет опережать фазовое напряжение на угол, равный 30° . Представляя этот ток в комплексной форме

$$\dot{J}_0 = J_0 \cos 30^\circ + j J_0 \sin 30^\circ = J_0 \frac{\sqrt{3}}{2} + j J_0 \cdot \frac{1}{2}$$

и складывая с током нагрузки, получаем ток, показываемый в этом случае амперметром

$$\dot{J}_2 = \dot{J}_1 + \dot{J}_0 = \left(J_1 \cos \varphi + J_0 \frac{\sqrt{3}}{2} \right) - j \left(J_1 \sin \varphi - J_0 \frac{1}{2} \right)$$

откуда

$$J_2^2 = J_1^2 + J_0^2 + J_1 J_0 (\sqrt{3} \cos \varphi - \sin \varphi) \quad (a)$$

Если теперь то же сопротивление переключить между другими фазами, т. е. включить его в опережающую фазу, то при равенстве линейных напряжений ток в этом сопротивлении останется прежней величины, но изменит свой сдвиг по отношению к фазовому напряжению. Так как этот ток будет в фазе с напряжением

$$\dot{V}_{13} = \dot{V}_1 - \dot{V}_3$$

то он будет отставать от напряжения V_1 на угол 30° , и будет представляться комплексом

$$\dot{J}''_0 = J_0 \cos 30^\circ - j J_0 \sin 30^\circ = J_0 \frac{\sqrt{3}}{2} - j J_0 \frac{1}{2}$$

Ток, проходящий в этом случае через амперметр, будет равен сумме

$$\dot{J}_3 = \dot{J}_1 + \dot{J}''_0 = \left(J_1 \cos \varphi + J_0 \frac{\sqrt{3}}{2} \right) - j \left(J_1 \sin \varphi + J_0 \frac{1}{2} \right)$$

откуда

$$J_3^2 = J_1^2 + J_0^2 + J_1 J_0 (\sqrt{3} \cos \varphi + \sin \varphi) \quad (b)$$

Если в последнем случае принять за линейное напряжение не \dot{V}_{13} , а

$$\dot{V}_{31} = \dot{V}_3 - \dot{V}_1$$

т. е. направленное в ту же сторону, как и напряжение V_{12} (против часовой стрелки), то вектор силы тока J_0 будет иметь прямопротивоположное направление, но для нахождения тока J_3 необходимо взять уже разность токов, а не сумму. Результат от этого, конечно, не изменится.

Вычитая уравнение (а) из уравнения (b), получаем

$$J_3^2 - J_2^2 = 2 J_1 J_0 \sin \varphi$$

откуда

$$\sin \varphi = \frac{J_3^2 - J_2^2}{2 J_1 J_0} = \frac{(J_3 - J_2)(J_3 + J_2)}{2 J_1 J_0} \quad (c)$$

Складывая те же уравнения, получаем

$$J_3^2 + J_2^2 = 2 J_1^2 + 2 J_0^2 + 2 \sqrt{3} J_1 J_0 \cos \varphi$$

откуда

$$\cos \varphi = \frac{J_3^2 + J_2^2 - 2 J_1^2 - 2 J_0^2}{2 \sqrt{3} J_1 J_0} \quad (d)$$

Последние два уравнения (с) и (d) могут служить для нахождения угла сдвига и коэффициента мощности. При этом, кроме трех показаний основного амперметра, необходимо знать еще и силу тока в сопротивлении R_0 , или величину последнего и линейное напряжение, вычисляя ток

$$J_0 = \frac{V}{R_0}$$

Вследствие необходимости брать отсчеты по двум приборам, могущим иметь ошибки разных знаков, точность результата получается не слишком большой.

3.

В уравнениях (а) и (в) или, что то же самое, в уравнениях (с) и (d), входят только два неизвестных—искомый угол сдвига фаз и сила тока J_0 , которая не может быть отсчитана по основному амперметру. Решая систему уравнений, можно каждую из этих величин определить по отдельности. Проще всего это получается, возводя уравнения (с) и (d) в квадрат и складывая отдельно правые и левые части. Так как

$$\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$$

то угол сдвига сокращается, и после упрощений получаем

$$J_3^4 + J_2^4 + J_1^4 + J_0^4 = J_3^2 J_2^2 + J_3^2 J_1^2 + J_3^2 J_0^2 + J_2^2 J_1^2 + J_2^2 J_0^2 + J_1^2 J_0^2$$

или

$$J_0^4 - J_0^2 (J_3^2 + J_2^2 + J_1^2) + [(J_3^4 + J_2^4 + J_1^4) - (J_3^2 J_2^2 + J_3^2 J_1^2 + J_2^2 J_1^2)] = 0$$

Вводя обозначения

$$\left. \begin{aligned} J_3^2 + J_2^2 + J_1^2 &= 2A \\ (J_3^4 + J_2^4 + J_1^4) - (J_3^2 J_2^2 + J_3^2 J_1^2 + J_2^2 J_1^2) &= B^2 \end{aligned} \right\} \quad (e)$$

получаем биквадратное уравнение

$$J_0^4 - 2AJ_0^2 + B^2 = 0,$$

решая которое имеем

$$J_0 = \pm \sqrt{A - \sqrt{A^2 - B^2}} \quad (f)$$

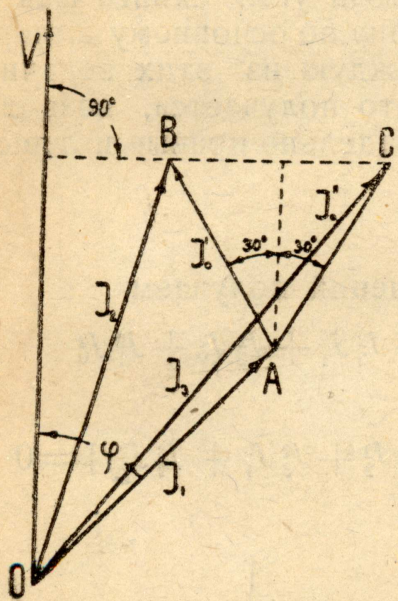
по которому, зная три показания основного амперметра, легко вычислить значение тока в сопротивлении. Необходимо отметить, что остальные значения для силы тока, получаемые как корни уравнения четвертой степени, соответствуют расположению векторов, не могущему быть в действительной цепи

Полученные два значения, отличающиеся только знаком, соответствуют емкостному и индуктивному сдвигу с равными коэффициентами мощности. В каждом случае легко выяснить, который из сдвигов имеется в цепи, для получения же числового значения этот выбор не является нужным.

Подставляя полученные значения J_0 в уравнения (c) и (d), находим

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{J_3^2 - J_2^2}{2J_1 \sqrt{A - \sqrt{A^2 - B^2}}} \\ \cos \varphi &= \frac{2\sqrt{A^2 - B^2} - 3J_1^2}{2\sqrt{3}J_1 \sqrt{A - \sqrt{A^2 - B^2}}} \quad (g) \end{aligned}$$

Используя эти уравнения, все измерения можно свести к трем отсчетам по амперметру—при нормальной работе (J_1), при включении некоторого омического сопротивления в отстающую фазу (J_2) и при включении того же сопротивления в опережающую фазу (J_3). По полученным отсчетам вычислить значения $\sin \varphi$ и $\cos \varphi$ не представляет никакого затруднения, но при производстве большого числа измерений оказывается слишком длинным и утомительным.



Черт. 3.

4.

Для упрощения работы можно, вместо вычислений, воспользоваться графическим построением, вытекающим из векторной диаграммы. Вынося вектора токов на отдельный чертеж, легко видеть (черт. 3), что их взаимное расположение получается вполне определенным.

Вектора трех токов J_1 ; J_2 и J_3 оказываются расположенными так, что их концы находятся на равностороннем треугольнике ABC , стороны которого равны силе тока J_0 в сопротивлении R_0 , а сторона BC располагается перпендикулярно к вектору напряжения.

Исходя из этого расположения, можно предложить следующий ход построения векторной диаграммы. Выбирая произвольное направление, откладываем на нем (черт. 4) три отрезка OA_1 ; OB_1 и OC_1 , равные в масштабе полученным отсчетам по амперметру J_1 , J_2 и J_3 . Через две из полученных точек (лучше самую ближнюю к точке O и самую дальнюю от нее) проводим вспомогательные окружности с центром в точке O . На чертеже 4 такие дуги проведены для точек A_1 и C_1 .

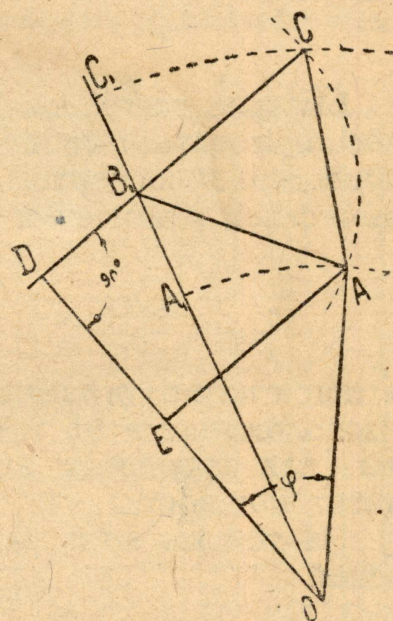
Равносторонний треугольник должен быть такого размера, чтобы своими вершинами он мог попасть на две проведенных дуги и в точку B_1 . Проводя из последней еще одну засечку радиусом B_1C_1 , несколько большим, чем длина отрезка A_1C_1 , получаем равнобедренный треугольник AB_1C_1 . Изменяя длину взятого радиуса BA , подбираем его так, чтобы расстояние AC получилось равным с ним по величине. Такое соотношение легко получить после двух-трех пробных засечек.

Полученный таким подбором треугольник AB_1C_1 будет равносторонним и будет соответствовать треугольнику ABC чертежа 3. Проводя из точки O прямую OA и опуская перпендикуляр OD на сторону BC построенного треугольника (или на ее продолжение), получаем искомый угол сдвига фаз, как угол между прямыми OA и OD . Опуская еще из точки A перпендикуляр AE на прямую OD , получим также коэффициент мощности из соотношения отрезков

$$\cos \varphi = \frac{OE}{OA}$$

Стороны построенного треугольника AB_1C_1 определяют в масштабе силу тока в сопротивлении R_0 . При построении этого треугольника, засечка из точки B может быть произведена и по другую сторону оси, что повлияет только на направления угла сдвига (емкостный или индуктивный), а не на его величину и значение $\cos \varphi$. Эти два расположения соответствуют двум значениям тока J_0 , получаемого из уравнения (f) и отличающихся только знаком. Зная, какая в сети имеется нагрузка, легко сообразить, какое расположение выбрать в каждом случае.

Если не знают, какая нагрузка имеется в сети, но известно чередование фаз, то можно пользоваться правилом, вытекающим из



Черт. 4.

чертежа 2 и уравнений (а) и (б). Для индуктивной нагрузки больший ток будет получаться при вставлении сопротивления R_0 в опережающую фазу, а при емкостной—в отстающую. Это же правило можно использовать для определения чередования фаз.

Построение треугольника ABC по длинам отрезков OA , OB и OC без подбора засечками, повидимому, является неразрешимой задачей.

5.

Быстрее всего коэффициент мощности можно получить, если воспользоваться специально для этого построенной номограммой, приведенной на чертеже 5. Беря по амперметру три отсчета J_1 ; J_2 и J_3 , вычисляем отношения

$$b = \frac{J_2}{J_1}; \quad c = \frac{J_3}{J_1}$$

и ищем на номограмме точку, соответствующую этим координатам. Расположение этой точки по отношению к пучку кривых, построенных для различных значений $\cos \varphi$, определяет искомый коэффициент мощности.

На той же номограмме проведена еще серия кривых для значений

$$a = \frac{J_0}{J_1}$$

при помощи которых можно определить значение тока J_0 . Номограмма черт. 5 построена только для индуктивной нагрузки, при которой $J_3 > J_2$ что соответствует значениям $c > b$. При емкостной нагрузке эти соотношения получаются обратными, что дает возможность использовать эту же часть номограммы, но с перестановкой значений b и c местами.

Для построения номограммы, разделим уравнения (а) и (б) на J_1^2 . Принимая во внимание обозначения, введенные выше, получаем после их подстановки

$$b^2 = 1 + a^2 + 2a \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \varphi \right)$$

$$c^2 = 1 + a^2 + 2a \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi + \frac{1}{2} \sin \varphi \right)$$

или

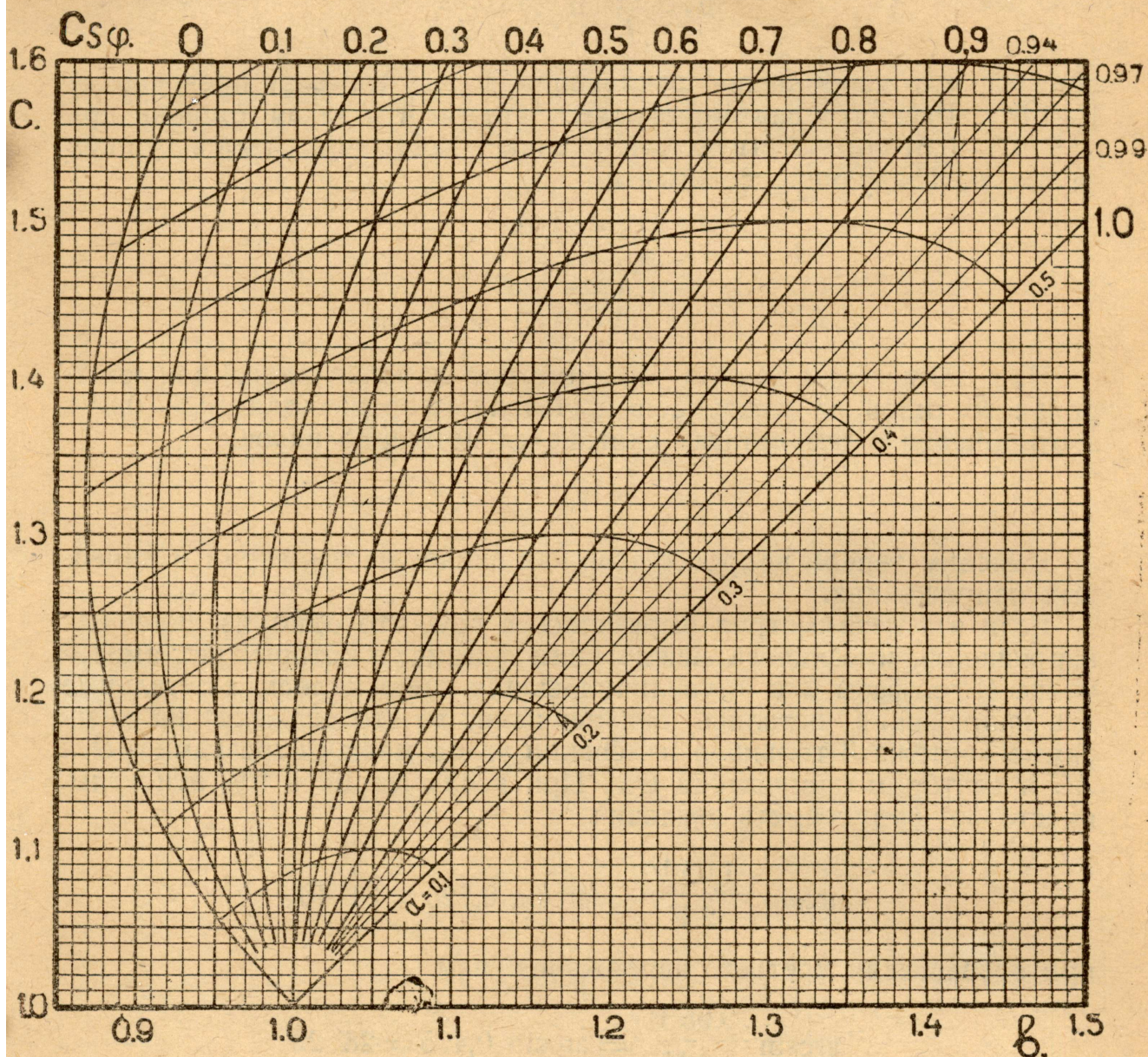
$$\begin{aligned} b^2 &= 1 + a^2 + 2a \cos(\varphi + 30^\circ) \\ c^2 &= 1 + a^2 + 2a \cos(\varphi - 30^\circ) \end{aligned} \quad (h)$$

Задаваясь различными значениями a и $\cos \varphi$ и вычисляя соответствующие значения b и c , получаем возможность построить всю

номограмму по токам. Вычисленные значения b и c для различных коэффициентов мощности приведены в таблице, в конце статьи.

6.

При производстве измерений, на точность результата имеют влияние точность амперметра, несимметрия линейных напряжений сети и дополнительные падения напряжения, вызываемые подключаемым



Черт. 5.

сопротивлением. Разберем, какие можно ожидать в этих случаях отличия получаемого значения $\cos \varphi$ от действительной его величины.

Неточность амперметра, при производстве всех отсчетов по одному прибору, будет только тогда оказывать влияние, когда

ошибка не пропорциональна показанию. Так как в большинстве случаев, если и нет такой пропорциональности целиком, но все же все ошибки имеют одного знака, то они будут частично сглаживать друг друга и влиять на окончательный результат сравнительно мало. Проверка ряда технических приборов переменного тока различных фирм и учет получающихся ошибок в величинах отношений

$$b = \frac{J_2}{J_1} \text{ и } c = \frac{J_3}{J_1}$$

показал, что наибольшие отклонения между ними не превосходят 1—1,5%. Рассматривая номограмму видим, что такая ошибка при $a = (0,3—0,5)$ соответствует отклонению в значениях $\cos \varphi$ в худшем случае на следующие величины:

$$\begin{array}{l} 0,1 \pm 0,03 \\ 0,5 \pm 0,04 \\ 0,8 \pm 0,03 \\ 1,0 \pm 0,00 \end{array}$$

При применении точных амперметров лабораторного или контрольного типов, расхождение в значениях не превосходит 0,5—0,8%, а отклонения в результатах снижаются примерно вдвое.

7.

Выясним теперь вопрос о том, как влияет несимметрия в линейных напряжениях.

Если эта несимметрия выразилась в том, что одно из линейных напряжений, имеющееся между теми фазами, в которых нет амперметра (т. е. фазы 2 и 3), увеличилось или уменьшилось, а остальные два напряжения остались неизменными, то это скажется на диаграмме чертежа 3 только в изменении углов между отрезками AB и AC и вектором напряжения OV . При несимметрии в 5% эти углы, вместо 30° будут иметь значения

$$\arcsin \frac{1,05 V}{2 V} = \arcsin 0,525 = 31^\circ 40'$$

при возрастании третьего напряжения, или

$$\arcsin \frac{0,95 V}{2 V} = \arcsin 0,475 = 28^\circ 22'$$

при его уменьшении.

Полагая, что при измерении было включено сопротивление R_0 из расчета

$$a = \frac{J_0}{J_1} = 0,5$$

и что нагрузка имела сдвиг фаз равный $\varphi = 60^\circ$, найдем по уравнениям (h), с изменением в них углов 30° на полученный выше, значения для b и c

$$b^2 = 1 + 0,5^2 + 2 \cdot 0,5^2 \cdot \cos(60^\circ + 31^\circ 40') = 1,221$$

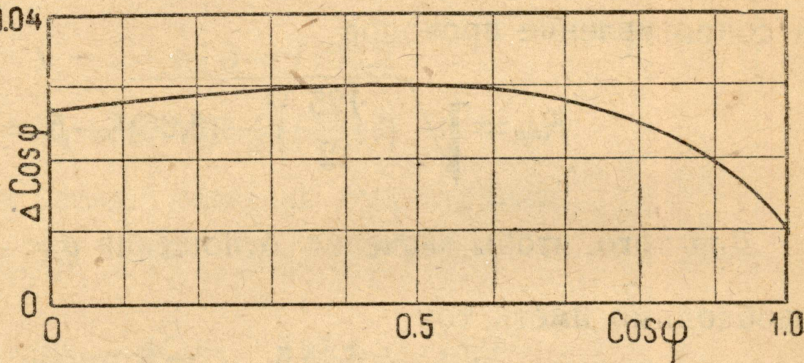
$$c^2 = 1 + 0,5^2 + 2 \cdot 0,5^2 \cdot \cos(60^\circ - 31^\circ 40') = 2,130$$

или $b = 1,105$ $c = 1,459$

Рассматривая эти значения, как полученные из опыта, находим по номограмме, что им соответствует $\cos \varphi = 0,47$, вместо действительного значения $\cos 60^\circ = 0,5$.

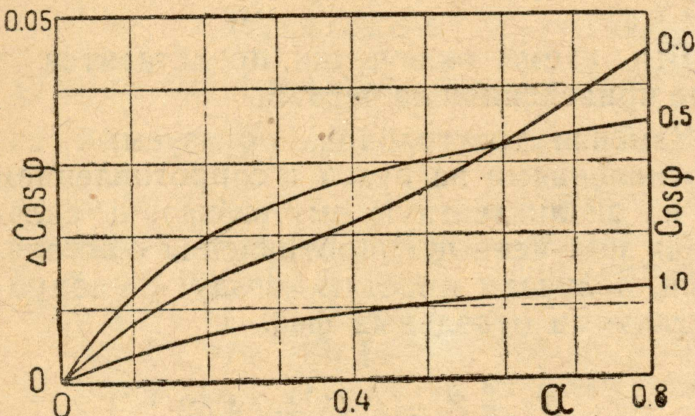
Подробным же образом для уменьшения напряжения, т. е. для угла $28^\circ 22'$ вместо 30° , получим значение $\cos \varphi = 0,53$. Таким образом, отклонение в получаемом значении коэффициента мощности может для данных условий достигать примерно 0,03 в ту и другую сторону.

Указанный случай при сдвиге в 60° и искажении напряжения между 2-й и 3-й фазами, будет иметь наибольшее отклонение в значениях $\cos \varphi$. При других углах сдвига фаз и других несимметриях напряжений, это отклонение будет меньше. Наименьшим оно получится при ваттной нагрузке. В этом случае при искажении напряжения между 2-й и 3-й фазой ошибки в результате не будет совсем при искажении же напряжения между 1-й фазой (в которой вставлен амперметр) и одной из двух других, ошибка может достигать только 0,01.



Черт. 6.

Производя подобные вычисления для всех возможных случаев, несимметрии напряжений, получаем кривую наибольших отклонений результата для 5% несимметрии напряжений и отношения $a = 0,5$, построенную на черт 6.



Черт. 7.

a возможная ошибка быстро возрастает.

Эти наибольшие возможные отклонения в большой степени зависят от выбранного сопротивления R_0 , т. е. от величины отношения a . Изменения их в зависимости от последней величины представлены на чертеже 7, из которого видим, что с увеличением отношения

Применение в качестве сопротивления R_0 реостата из металлических ламп накаливания уменьшает ошибку, в виду увеличения его сопротивления при увеличении напряжения.

8.

Для выяснения влияния дополнительного падения напряжения в подводящих проводах, получающегося в связи с включением сопротивления R_0 , проведем примерный расчет для одной из нагрузок.

Для этого расчета возьмем цепь с фазовым напряжением нагрузки 120 В (линейное 208 В) и нагрузку, потребляющую 12 А при индуктивном сдвиге в 60° . ($\cos \varphi = 0,5$). Сопротивление проводов примем только омическим с таким расчетом, чтобы напряжение источника тока (сети) было не более 125 В (падение напряжения около 4%).

Сопротивление фазы нагрузки будет равно

$$\dot{Z}_n = \frac{V}{J} (\cos \varphi + j \sin \varphi) = \frac{120}{12} (0,5 + j 0,866) = 5 + j 8,66$$

а сопротивление проводов

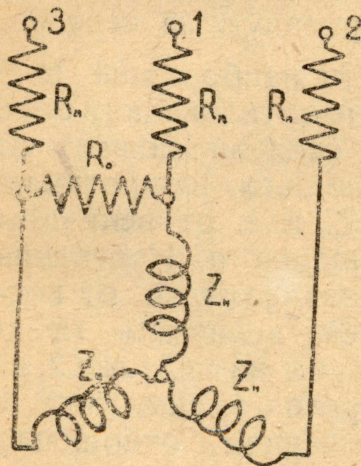
$$R_{np} = \sqrt{\left(\frac{125}{12}\right)^2 - (8,66)^2} - 5 = 0,78 \text{ ома}$$

Для того, чтобы значения отношения $a = \frac{J_0}{J_1}$ было близко к $0,5$, необходимо иметь ток

$$J_0 = 0,5 \cdot J_1 = 6 \text{ ампер}$$

или сопротивление

$$R_0 = \frac{208}{6} = 34,7 \cong 35 \text{ ом.}$$



Черт. 8.

Вся схема включения представится в виде приведенной на черт. 8.

Заменяя треугольник, образуемый сопротивлениями нагрузки и сопротивлением R_0 на эквивалентную ему звезду, и складывая полученные сопротивления с остальными, получаем простую звезду с сопротивлениями отдельных фаз.

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_3 = 6,41 + j 4,52$$

$$\dot{Z}_2 = 5,46 + j 10,71$$

или

$$Z_1 = Z_3 = 7,84 \text{ ома}$$

$$Z_2 = 12,01 \text{ ома}$$

Найдя теперь проводимости отдельных фаз

$$\dot{Y}_1 = \dot{Y}_3 = 0,104 - j 0,0735$$

$$\dot{Y}_2 = 0,378 - j 0,0742$$

вычисляем потенциал нулевой точки эквивалентной звезды нагрузки по отношению нулевой точки сети.

$$\dot{V}_0 = \frac{\sum \dot{V}_n \cdot \dot{Y}_n}{\sum \dot{Y}_n}$$

где \dot{V}_n — фазовые напряжения сети

$$\dot{V}_2 = 125 + j 0$$

$$\dot{V}_3 = -62,5 - j 108,2$$

$$\dot{V}_1 = -62,5 + j 108,2$$

Напряжения на фазах звезды нагрузки будут равны

$$\dot{V}'_1 = \dot{V}_1 - \dot{V}_0 = -44,1 + j 125,1$$

$$\dot{V}'_2 = \dot{V}_2 - \dot{V}_0 = 143,4 + j 16,9$$

$$\dot{V}'_3 = \dot{V}_3 - \dot{V}_0 = -44,1 - j 91,3$$

Откуда их величины

$$V'_1 = 132,5 \text{ V}; V'_2 = 144,8 \text{ V и } V'_3 = 101,5 \text{ V}$$

деля на сопротивления фаз, находим силы тока в проводах

$$J'_1 = 16,9 \text{ A}; J'_2 = 12,1 \text{ A}; J'_3 = 12,93 \text{ A}$$

легко видеть, что ток J'_1 соответствует току, проходящему через амперметр при вставлении сопротивления R_0 в опережающую фазу (т. е. отсчету J_3), а ток J'_3 — при вставлении сопротивления в отстающую фазу (т. е. отсчету J_2)

Помня, что при работе без сопротивления нагрузка потребляла 12 ампер (т. е. $J_1 = 12 \text{ A}$), находим отношения

$$c = \frac{16,9}{12} = 1,41 \quad b = \frac{12,93}{12} = 1,08$$

По этим значениям по номограмме получаем значение $\cos \varphi = 0,46$, отличающееся от действительного ($\cos \varphi = 0,5$) в сторону уменьшения на 0,04.

Производя подобные же расчеты для других условий, легко видеть, что это отклонение от истинной величины будет больше при меньшем коэффициенте мощности или большей силе тока в дополнительном сопротивлении. При $\cos \varphi = 1$ ошибки не будет совсем, при $\cos \varphi = 0$ она достигнет почти 0,1. Индуктивность проводов несколько улучшает результат при индуктивной же нагрузке, но ухудшает при емкостной. При увеличении падения напряжения в проводах ошибка возрастает почти пропорционально таковому (немного медленнее). Наличие нулевого провода почти не отражается на получающейся ошибке.

Для случаев нормальной работы сетей и нагрузок, подобные подсчеты показали, что ошибка обычно не превосходит значения

$$\Delta \cos \varphi \leq 0,1 (1 - \cos \varphi)$$

в сторону уменьшения результата.

9.

Проверяя применение этого способа к измерению коэффициентов мощности асинхронных моторов в различных условиях их работы и сравнивая получаемые результаты с показаниями фазометра, оказалось, что ошибка ни разу не превысила значения 0,05, будучи обычно равными 0,02—0,03. В большинстве случаев из-за падения напряжения в проводах, эта ошибка была в сторону уменьшения результата и только при нескольких измерениях она оказалась в сторону увеличения (вероятно, из-за несимметрии напряжений). Так как измерения производились примерно при таких же условиях, какие обычно имеются в промышленных установках, можно считать, что и там больших расхождений получаться не будет.

Таким образом данный способ применим в тех случаях, когда не требуется знать точной величины коэффициента мощности, а достаточно иметь его с отклонением до 0,05 в ту или другую сторону. Необходимость включения реостата R_0 ставит предел применения этого способа для мощностей не свыше 30—40 KVA в сетях с напряжением до 380 вольт.

10.

Данный способ измерения может быть изменен, включая вместо омического сопротивления R_0 , индуктивные или емкостные. В этом случае в диаграмме чертежа 4 угол между отрезками BC и OD должен быть не 90° , а другой, в соответствии с включаемым сопротивлением. Обозначая угол сдвига для последнего через φ_0 , получаем

$$\angle CDO = 90 \pm \varphi_0$$

Уравнения (c), (d), (f), (g) и (h) получают другое, еще более сложное выражение, номограмма же чертежа 5 даст значения

$$\cos(\varphi \pm \varphi_0)$$

При включении одной емкости, уравнения (c) дает значение $\cos \varphi$, а уравнение (d) — $\sin \varphi$, номограмма же чертежа 5 значения $\sin \varphi$, но в тех пределах, как она построена действительна только для емкостной нагрузки.

Замена омического сопротивления на емкость может иметь некоторые значения при измерении $\cos \varphi$ в высоковольтных сетях.

Вместо амперметра можно использовать щипцы Диттца, производя ими измерения в различных местах цепи. В этом случае легко измерить также и I_0 , а, следовательно, воспользоваться уравнениями (c) и (d).

В настоящее время разрабатывается конструкция щипцов и амперметров, которые дали бы возможность производить такие измерения для любых мощностей и напряжений, при чем таковые измерения смогут быть распространены и на однофазный ток.

В заключение необходимо отметить, что при применении описанного способа к цепям трехфазного тока с несимметричной нагрузкой фаз, получаемые значения $\cos \varphi$ будут относиться к той фазе, в которой имелся амперметр и будут соответствовать углу сдвига между током в проводе и фазовым напряжением сети, считая таковые симметричными.

Таблица значений, необходимых для построения номограммы чертежа 5.

Cos φ	$\begin{array}{c} a \\ b \text{ и } c \end{array}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
0,0	<i>c</i>	1.054	1.113	1.179	1.249	1.323	1.400	1.480	1.562
	<i>b</i>	0.954	0.917	0.889	0.872	0.866	0.872	0.889	0.917
0,1	<i>c</i>	1.063	1.128	1.200	1.276	1.356	1.437	1.520	1.608
	<i>b</i>	0.963	0.936	0.918	0.912	0.916	0.933	0.957	0.992
0,2	<i>c</i>	1.071	1.143	1.220	1.300	1.384	1.470	1.556	1.644
	<i>b</i>	0.973	0.956	0.947	0.952	0.965	0.988	1.023	1.064
0,3	<i>c</i>	1.078	1.157	1.238	1.322	1.410	1.499	1.588	1.680
	<i>b</i>	0.982	0.976	0.979	0.993	1.017	1.049	1.089	1.138
0,4	<i>c</i>	1.085	1.168	1.254	1.342	1.432	1.521	1.617	1.711
	<i>b</i>	0.993	0.998	1.011	1.034	1.067	1.108	1.154	1.208
0,5	<i>c</i>	1.089	1.178	1.269	1.361	1.454	1.549	1.644	1.739
	<i>b</i>	1.004	1.020	1.044	1.077	1.119	1.167	1.220	1.318
0,6	<i>c</i>	1.093	1.187	1.281	1.377	1.474	1.571	1.668	1.763
	<i>b</i>	1.016	1.043	1.078	1.121	1.170	1.226	1.287	1.352
0,7	<i>c</i>	1.097	1.193	1.291	1.389	1.488	1.586	1.683	1.785
	<i>b</i>	1.029	1.068	1.113	1.166	1.224	1.288	1.359	1.428
0,8	<i>c</i>	1.099	1.198	1.298	1.397	1.497	1.597	1.698	1.798
	<i>b</i>	1.043	1.094	1.151	1.214	1.282	1.352	1.428	1.508
0,9	<i>c</i>	1.099	1.199	1.299	1.398	1.498	1.598	1.698	1.798
	<i>b</i>	1.058	1.125	1.193	1.267	1.344	1.425	1.510	1.593
0,97	<i>c</i>	1.097	1.194	1.291	1.389	1.489	1.587	1.683	1.783
	<i>b</i>	1.074	1.152	1.234	1.317	1.403	1.491	1.580	1.672
1,0	$c = b$	1.089	1.178	1.269	1.361	1.454	1.549	1.644	1.739