

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 19

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Теоретические замечания

Рассмотрим прежде всего цепь переменного тока, содержащую только одно активное сопротивление, как показано на рис. 1, а. В этом случае, если

$$V = V_m \cdot \cos \omega t, \quad (1)$$

то

$$I = I_m \cdot \cos \omega t, \quad (2)$$

где $I_m = V_m/R$.

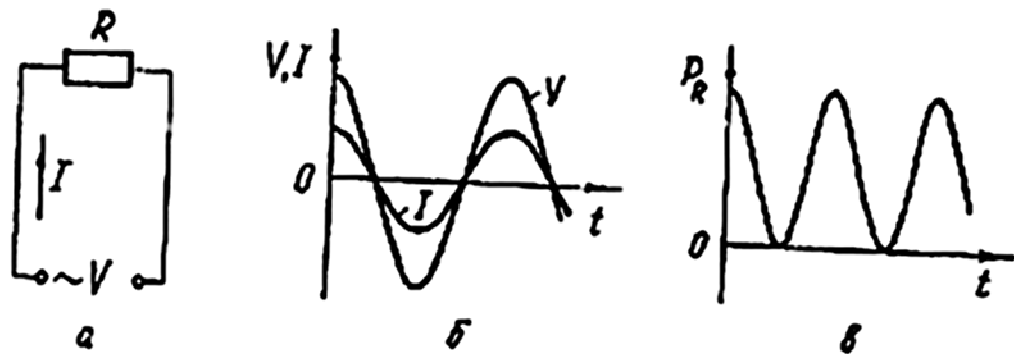


Рис. 1

Ток и напряжение изменяются в фазе, что иллюстрируется рис. 1, б, где показана зависимость мгновенных значений I и V от времени.

Мгновенная мощность, выделяемая на активном сопротивлении и целиком превращаемая в тепло, будет равна

$$P_R(t) = V(t) \cdot I(t) = I_m \cdot V_m \cdot \cos^2 \omega t = \frac{I_m V_m}{2} \times \\ \times (1 + \cos 2\omega t). \quad (3)$$

Зависимость мгновенной мощности, выделяемой на активном сопротивлении, от времени показана на рис. 1, в. Как видно из рис. 1, в и соотношения (3), мгновенная мощность изменяется во времени с частотой, в два раза большей частоты изменения напряжения, однако эта мощность всегда остается положительной.

Для практики часто важно не мгновенное, а среднее значение мощности, вычисленное за относительно большой период времени. Так как речь идет о периодическом процессе, то для нахождения среднего значения достаточно вычислить среднее значение мощности за один период. Тогда

$$P_R = \frac{1}{T} \int_0^T P_R(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{I_m V_m}{2} (1 + \cos 2\omega t) dt = \\ = \frac{1}{2} I_m V_m, \quad (4)$$

или, вводя эффективные значения тока и напряжения,

$$P_R = I_{\text{эф}} \cdot V_{\text{эф}}. \quad (5)$$

Эта мощность в цепи переменного тока, выделяемая в виде тепла на активном сопротивлении, называется активной мощностью. Активная мощность развивается тогда, когда ток и напряжение изменяются в фазе.

Таким образом, если в цепи переменного тока имеется только активное сопротивление, то среднее значение мощности, выделяемой на этом сопротивлении, будет определяться, как и в случае цепи постоянного тока, произведением эффективных значений тока и напряжения.

Пусть теперь в цепь переменного тока включена индуктивность L с пренебрежимо малым активным сопротивлением (рис. 2, а). В этом случае, если напряжение в цепи изменяется по закону

$$V = V_m \cdot \cos \omega t,$$

Ток в цепи будет изменяться по закону

$$I = I_m \cdot \cos(\omega t - \pi/2) \quad (6)$$

где $I_m = V_m / \omega L$.

Зависимости напряжения и тока на индуктивности от времени представлены на рис. 2, б. Мгновенное значение мощности в такой цепи

$$\begin{aligned} P_L(t) &= V(t) \cdot I(t) = V_m \cdot I_m \cos \omega t \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= 0,5 I_m V_m \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (7)$$

Зависимость мгновенной мощности в рассматриваемой цепи от времени представлена на рис. 2, в. Как видно из соотношения (7) и рис. 2, в, и в этом случае мгновенная мощность изменяется с частотой, в два раза превышающей частоту изменения напряжения. Однако в отличие от случая чисто активной нагрузки в рассматриваемом случае мощность является гармонической функцией времени, и поэтому ее среднее значение за период будет равно нулю. В первую четверть периода, когда ток в цепи по абсолютной величине возрастает, мощность в цепи положительна, т. е. мощность забирается от генератора. Она идет на увеличение энергии,

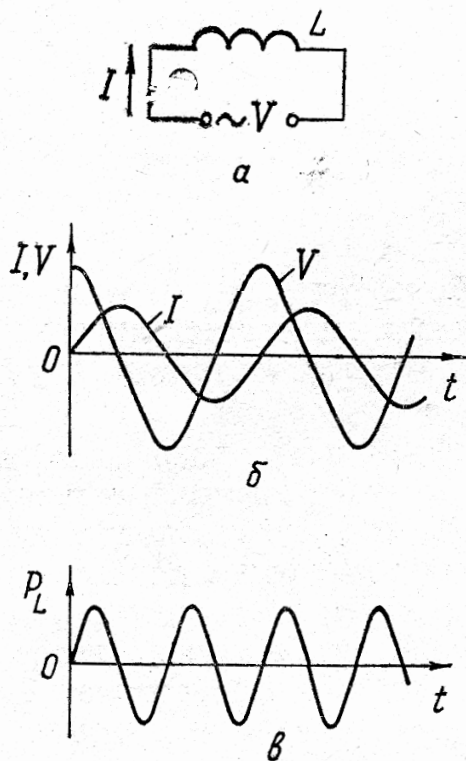


Рис. 2

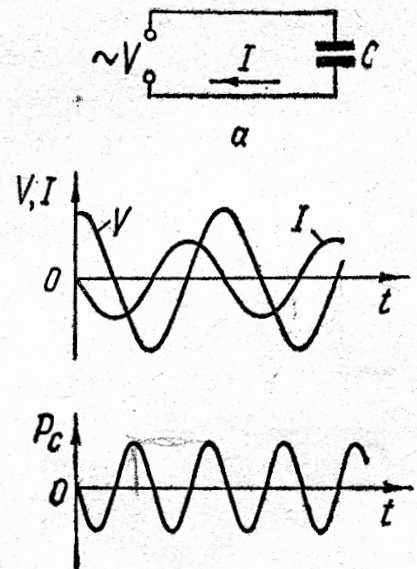


Рис. 3

запасаемой в индуктивности в виде энергии магнитного поля. В следующую четверть периода, когда ток уменьшается, мощность в цепи становится отрицательной, т. е. эта мощность возвращается в генератор. Источником ее является энергия, запасенная ранее в индуктивности. В следующую половину периода процесс повторяется.

Таким образом, хотя индуктивность, включенная в цепь переменного тока, и не потребляет в среднем энергию от генератора, в цепи происходит постоянный энергообмен между генератором и реактивной в данном случае индуктивной нагрузкой. Причем максимальное значение этой колеблющейся мощности в соответствии с (7) равно

$$P_{L\max} = I_m V_m / 2 = I_{\text{эф}} V_{\text{эф}}.$$

Эта колеблющаяся между генератором и реактивным сопротивлением мощность называется реактивной мощностью. Появление реактивной мощности связано со сдвигом на $\pi/2$ фазы между током и напряжением.

Рассмотрим теперь цепь переменного тока, содержащую только емкость (рис. 3 а). Если напряжение изменяется по закону $V = V_m \cdot \cos \omega t$, то ток в цепи будет изменяться по закону

$$I = I_m \cdot \cos (\omega t + \pi/2), \quad (8)$$

где $I_m = V_m \cdot \omega C$.

Зависимости V и I от времени для рассматриваемой цепи показаны на рис. 3, б. Мгновенное значение мощности в цепи

$$\begin{aligned} P_c(t) &= V(t) \cdot I(t) = V_m \cdot I_m \cdot \cos \omega t \cdot \cos (\omega t - \pi/2) = \\ &= -0,5 I_m V_m \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (9)$$

Зависимость мгновенной мощности в цепи от времени для этого случая представлена на рис. 3, в.

Как видно из соотношения (9) и рис. 3, в, в этом случае мгновенная мощность изменяется с частотой, в два раза превышающей частоту изменения напряжения. Как и в случае индуктивной нагрузки, мощность, потребляемая емкостью, является гармонической функцией времени. В ту четверть периода, когда напряжение в цепи по абсолютной величине возрастает, мощность в цепи положительна, т. е. она забирается от генератора. Эта мощность идет на увеличение энергии, запасаемой в емкости в виде энергии электрического поля. В следующую четверть периода, когда напряжение на емкости уменьшается, мощность в цепи становится отрицательной, т. е. она возвращается в генератор. Таким образом, хотя емкость и не потребляет в среднем энергию от генератора, наличие ее в цепи приводит к периодическому энерго-

обмену между генератором и реактивной емкостной нагрузкой. Максимальное значение колеблющейся мощности, как видно из соотношения (9), и в этом случае будет равно

$$P_{\text{сmax}} = I_m V_m / 2 = I_{\text{эф}} V_{\text{эф}}.$$

Таким образом, в случае реактивной нагрузки (либо индуктивной, либо емкостной) цепь переменного тока в среднем не потребляет мощности, однако в цепи появляется колеблющаяся реактивная мощность, максимальное значение которой определяется произведением $I_{\text{эф}} \cdot V_{\text{эф}}$.

Рассмотрим цепь переменного тока, состоящую из двух последовательно соединенных реактивных элементов L и C , как показано на рис. 4, а.

Если напряжение изменяется по закону $V = V_m \cdot \cos \omega t$, то ток в такой цепи будет определяться соотношением

$$I = I_m \cdot \cos (\omega t \pm \pi/2), \quad (10)$$

$$I_m = \frac{V_m}{\left| \omega L - \frac{1}{\omega C} \right|}.$$

В соотношении (10) перед $\pi/2$ берется знак минус, если $\omega L > 1/\omega C$, т. е. когда индуктивное сопротивление больше емкостного, и знак плюс, если $\omega L < 1/\omega C$. Мгновенная мощность в рассматриваемой цепи

$$\begin{aligned} P(t) &= V(t) \cdot I(t) = V_m I_m \cdot \cos \omega t \cdot \cos (\omega t \pm \pi/2) = \\ &= (\pm 0,5 I_m V_m \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (11)$$

Как видно, и в том случае, когда в цепь одновременно включены L и C , средняя мощность оказывается равной нулю, а максимальное значение колеблющейся мощности по-прежнему равно произведению $I_{\text{эф}} \cdot V_{\text{эф}}$.

Проанализируем соотношение (11) более подробно. Используя связь V_m и I_m , преобразуем выражение (11) к виду

$$P(t) = 0,5 I_m^2 (\omega L - 1/\omega C) \sin 2\omega t. \quad (12)$$

Но $I_m \omega L = V_{Lm}$ — амплитуда напряжения на индуктивности, а $I_m 1/\omega C = V_{Cm}$ — амплитуда напряжения на емкости.

Тогда (12) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} P(t) &= 0,5 I_m V_{Lm} \cdot \sin 2\omega t - 0,5 I_m \cdot V_{Cm} \cdot \sin 2\omega t = \\ &= P_L(t) + P_C(t). \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь $P_L(t)$ и $P_C(t)$ — мгновенные значения мощностей в индуктивности и емкости по отдельности. Зависимости P_L , P_C и P от времени, определяемые равенством (13), показаны на рис. 4, б, в, г. Как видно из этих рисунков и из равен-

ства (13), максимальное значение колеблющейся мощности, которая циркулирует между генератором и цепью, оказывается меньше, чем максимальное значение мощности, запа-

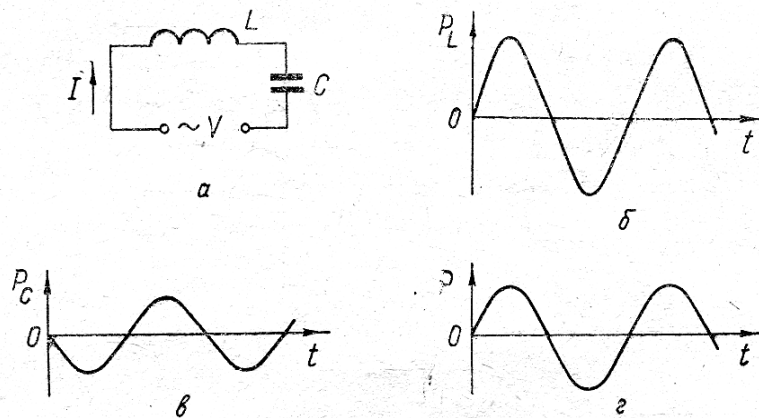


Рис. 4

саемой в одном из реактивных элементов цепи. Это связано с тем, что часть мощности колеблется между индуктивностью и емкостью.

Таким образом, в цепи состоящей из двух реактивных элементов L и C , среднее значение мощности равно нулю. Максимальное значение колеблющейся между генератором и нагрузкой мощности по-прежнему равно произведению $I_{\text{эф}} \cdot V_{\text{эф}}$. Однако часть запасенной в L и C энергии не уходит в генератор, а колеблется между емкостью и индуктивностью, переходя из энергии магнитного поля в энергию электрического поля и обратно. Эта энергия забирается от генератора в переходном процессе, протекающем при подключении к нему цепи.

Рассмотрим теперь цепь, составленную из последовательно соединенных R , L и C , как показано на рис. 5, а. Если на вход такой цепи подано напряжение $V = V_m \cdot \cos \omega t$, то в цепи возникает ток

$$I = I_m \cdot \cos (\omega t - \varphi),$$

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}; \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}.$$

Векторная диаграмма рассматриваемой цепи для случая $\omega L > 1/\omega C$ показана на рис. 5, б. Мгновенное значение мощности в такой цепи будет равно

$$P(t) = I(t) \cdot V(t) = I_m \cdot V_m \cdot \cos \omega t \cdot \cos (\omega t - \varphi) = \\ = I_m V_m \cdot \cos \varphi \cdot \cos^2 \omega t + 0,5 I_m V_m \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t. \quad (14)$$

Зависимости V , I и P для этого случая представлены на рис. 5, в, г.

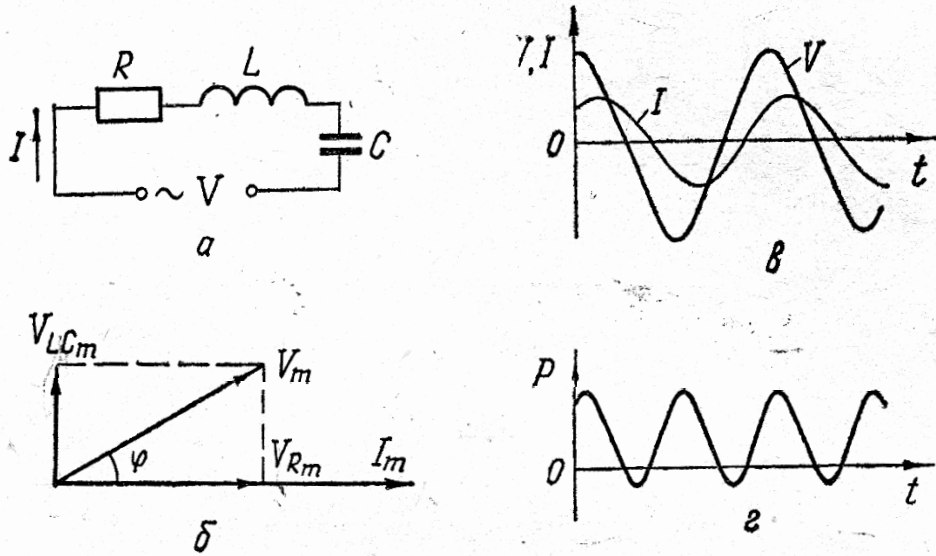


Рис. 5

Как видно из равенства (14), в выражении для мгновенной мощности имеются два слагаемых, имеющих разные зависимости от времени. Обращаясь к векторной диаграмме цепи на рис. 5, б, видим, что первое слагаемое определяет мгновенное значение мощности на активном сопротивлении, так как падение напряжения на этом сопротивлении $V_R = V_m \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega t$. Таким образом, мгновенное значение активной мощности в цепи равно

$$P_a(t) = I_m \cdot V_m \cdot \cos \varphi \cdot \cos^2 \omega t, \quad (15)$$

а среднее значение мощности за период:

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T P_a(t) dt = 0,5 \cdot I_m \cdot V_m \cdot \cos \varphi = I_{\text{эф}} \cdot V_{\text{эф}} \cdot \cos \varphi. \quad (16)$$

Второе слагаемое в соотношении (14) представляет собой произведение $V_{LC} \cdot I$, т. е. является мгновенным значением реактивной мощности

$$P_r(t) = 0,5 I_m \cdot V_m \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t. \quad (17)$$

Среднее значение этой мощности на период будет, очевидно, равно нулю.

Амплитудное же значение реактивной мощности называют просто реактивной мощностью в цепи переменного тока

$$P_r = 0,5 I_m \cdot V_m \cdot \sin \varphi = I_{\text{эф}} \cdot V_{\text{эф}} \cdot \sin \varphi. \quad (18)$$

Произведение $I_{\text{эф}}$, $V_{\text{эф}}$ называют кажущейся мощностью и выражают в вольтамперах (ВА).

Кажущаяся, активная и реактивная мощности связаны между собой простым соотношением

$$(I_{\text{эф}} \cdot V_{\text{эф}})^2 = P_a^2 + P_r^2. \quad (19)$$

Знание активной, реактивной и кажущейся мощностей совершенно необходимо для правильного расчета цепей переменного тока. Действительно, хотя среднее значение реактивной мощности равно нулю, наличие ее увеличивает ток в цепи. А расчет сечения проводов в цепях переменного тока должен производиться на полный ток $I_{\text{эф}}$, и мощность источника внешней ЭДС должна быть равна кажущейся мощности $I_{\text{эф}} \cdot V_{\text{эф}}$, хотя используется в цепи только активная мощность $P_a = I_{\text{эф}} \cdot V_{\text{эф}} \cdot \cos \varphi$. Поэтому в силовых цепях переменного тока для более эффективного использования возможностей генератора необходимо принимать все меры для увеличения $\cos \varphi$. Если цепь переменного тока содержит значительную индуктивность, то для уменьшения реактивной мощности в цепь следует включить соответствующим образом подобранную емкость. В этом случае энергия, запасаемая в индуктивности и затем отдаваемая ею, будет циркулировать не между индуктивностью и генератором, а между индуктивностью и емкостью.

Кажущаяся мощность может быть определена из измерения тока $I_{\text{эф}}$ и напряжения $V_{\text{эф}}$ в цепи.

Среднее значение мощности может быть измерено при помощи специальных приборов — ваттметров. Из существующих типов наибольшим распространением пользуются ваттметры электродинамической системы. Шкала такого ваттметра практически равномерна, и показания его одинаковы при измерении мощности на постоянном и на переменном токе в относительно широком диапазоне частот. Этим он выгодно отличается от ваттметров других систем.

Рассмотрим устройство и способ включения ваттметра электродинамической системы. Ваттметр этой системы имеет две катушки (рис. 6) — подвижную, из тонкой проволоки с большим числом витков и большим сопротивлением I , и не-

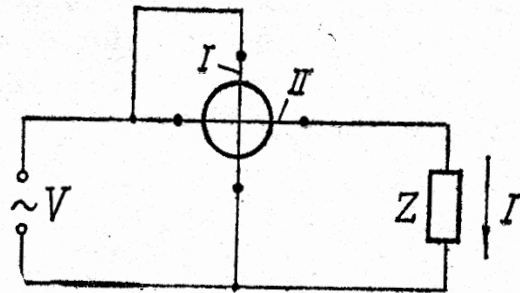


Рис. 6

подвижную, с малым сопротивлением II. Толстая обмотка включена последовательно с нагрузкой, где нужно измерить мощность, и ток в ней, так же как в амперметре, равен току в нагрузке. Тонкая обмотка включается параллельно нагрузке, и ток в ней, так же как в вольтметре, пропорционален напряжению на нагрузке. Для того чтобы ток в этой обмотке был в фазе с напряжением на ней, в цепь включаются дополнительные реактивные (обычно емкостные) сопротивления для компенсации собственной индуктивности этой катушки.

Если разность потенциалов между концами обмотки I, равная напряжению на нагрузке, изменяется по закону

$$V = V_m \cdot \cos \omega t, \quad (20)$$

то ток, проходящий через обмотку I, будет равен

$$I_2 = \frac{V_m}{R_2} \cos \omega t, \quad (21)$$

где R_2 — сопротивление обмотки I.

Ток в обмотке II будет равен току нагрузки

$$I_1 = I = I_m \cdot \cos(\omega t - \varphi). \quad (22)$$

Из общих положений о взаимодействии проводников с токами следует, что мгновенное значение вращательного момента электродинамических сил, приложенных к подвижной рамке ваттметра, будет пропорционально произведению токов $I_1 \cdot I_2$:

$$M = k I_m V_m \cdot \cos(\omega t - \varphi) \cdot \cos \omega t, \quad (23)$$

где k — некоторая постоянная, зависящая от конструктивных данных обмоток I и II.

Этот вращающий момент будет поворачивать рамку до тех пор, пока он не уравнивается возвращающим моментом, действующим на рамку со стороны противодействующей пружины. Так как противодействующая пружина работает в пределах упругой деформации, то угол поворота катушки будет пропорционален вращающему моменту.

Благодаря инерции, присущей подвижной катушке, ее отклонение будет пропорционально среднему за период T значению вращающего момента, равному

$$\bar{M} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = k \cdot \frac{1}{2} I_m \cdot V_m \cos \varphi = k P_a. \quad (24)$$

Из этого выражения следует, что среднее за период значение момента сил, определяющее угол поворота подвижной

рамки, пропорционально средней мощности, развиваемой переменным током в том участке цепи, к которому подключен ваттметр. Колебания энергии, происходящие в цепи переменного тока без расхода на совершение внешней работы, не влияют на показания ваттметра. Определив с помощью ваттметра активную мощность и измерив с помощью амперметра и вольтметра эффективные значения тока и напряжения, можно найти сдвиг фаз между током и напряжением в цепи:

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{I_{\text{эф}} \cdot V_{\text{эф}}}.$$

Кроме описанного выше метода измерения сдвига фаз при помощи ваттметра, может быть применен для определения сдвига фаз электронный осциллограф.

На рис. 7 приведена схема для исследования участка цепи переменного тока, заключенного в пунктирном прямоугольнике. Одна пара пластин осциллографа включена параллельно исследуемому участку, другая — эталонному конденсатору C_0 , введенному в схему специально для измерительных целей.

Проанализируем работу схемы. Напряжение, поданное на вертикально отклоняющие пластины, равно напряжению V_{RLC} . Следовательно, отклонение луча в направлении оси Y будет равно

$$y = \frac{V_{RLC}}{q} = \frac{V_m}{q} \cdot \cos \omega t, \quad (25)$$

где q — вольтовая чувствительность осциллографа в направлении y , которая выражается в В/см и зависит от используемого в данных условиях коэффициента усиления осциллографа.

Величина отклонения луча в направлении x пропорциональна напряжению на эталонном конденсаторе. Легко видеть, что это напряжение, в свою очередь, пропорционально силе тока в цепи. В самом деле, наличие тока приведет к появлению на конденсаторе заряда

$$Q = \int_0^t I_m \cos(\omega t - \varphi) dt = \frac{I_m}{\omega} \sin(\omega t - \varphi), \quad (26)$$

а следовательно, и разности потенциалов

$$V_0 = \frac{Q}{C_0} = \frac{I_m}{\omega C_0} \cdot \sin(\omega t - \varphi), \quad (27)$$

амплитуда которой пропорциональна силе тока.

Следовательно, введение в цепь эталонного конденсатора позволяет подать на горизонтально отклоняющие пластины напряжение, амплитуда которого пропорциональна амплитуде силы тока в цепи. Отклонение луча в направлении оси x будет:

$$x = \frac{V_0}{p} = \frac{I_m}{p\omega C_0} \cdot \sin(\omega t - \varphi), \quad (28)$$

где p — вольтовая чувствительность луча осциллографа в направлении x .

Таким образом, на пластины осциллографа будут поданы два синусоидальных напряжения с равными частотами, но с разными амплитудами и фазами. Амплитуды этих напряжений пропорциональны множителям, входящим в формулу мощности (16).

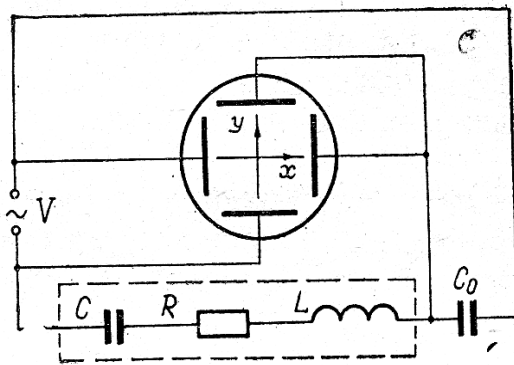


Рис. 7

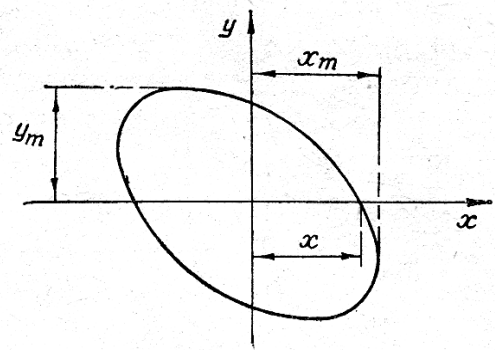


Рис. 8

Известно, что в результате сложения двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний с равными частотами суммарное колебание является в общем случае движением по эллиптической траектории. Следовательно, в данном случае луч должен вычерчивать на экране осциллографа эллипс (рис. 8). Уравнение этого эллипса, как нетрудно показать из (25) и (28), будет иметь вид

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} + \frac{2xy}{A \cdot B} \sin \varphi = \cos^2 \varphi, \quad (29)$$

где $A = I_m / p\omega C_0$; $B = V_m / q$.

Следует заметить, что напряжение, поданное на вертикально отклоняющие пластины, будет в фазе с исследуемым напряжением V_{RLC} . Но напряжение, отклоняющее электронный луч вдоль оси x , будет в результате применения вспомогательного конденсатора смещено по фазе относительно тока на $-\pi/2$.

Так, например, при синфазности тока и напряжения в исследуемой цепи отклонения электронного луча по x и y будут иметь между собой сдвиг фаз — $\pi/2$, и на экране осциллографа вместо прямой линии получится эллипс, главные оси которого будут ориентированы по осям координат x и y . В частности, этот эллипс может обратиться в окружность.

Легко установить связь параметров эллипса со сдвигом фаз между током и напряжением.

Очевидно, что ориентация эллипса по отношению к осям координат зависит от угла φ . Из (29) видно, что при $y=0$

$$\cos \varphi = x/x_m, \quad (30)$$

где $x_m=A$ — амплитуда смещения по оси x , x — координата точки пересечения эллипса с осью абсцисс (при $y=0$) (рис. 8).

Экспериментальная часть

Цель работы: ознакомиться с различными способами измерения параметров цепей переменного тока.

Упражнение 1. *Определение мощности в цепи переменного тока и сдвига фаз между током и напряжением с помощью электроизмерительных приборов*

Для определения $\cos \varphi$ в цепи переменного тока используется схема, изображенная на рис. 9 и позволяющая измерить P_a , $I_{\text{эф}}$ и $V_{\text{эф}}$.

По данным этих измерений можно найти основные параметры цепи:

- 1) $\cos \varphi = P_a / I_{\text{эф}} \cdot V_{\text{эф}}$;
- 2) реактивную мощность

$$P_r = \sqrt{I_{\text{эф}}^2 \cdot V_{\text{эф}}^2 - P_a^2};$$

- 3) полное сопротивление участка цепи переменному току

$$Z = V_{\text{эф}} / I_{\text{эф}};$$

- 4) активное сопротивление цепи

$$R = P_a / I_{\text{эф}}^2;$$

- 5) реактивное сопротивление цепи

$$|\omega L - 1/\omega C| = P_r / I_{\text{эф}}^2.$$

В данной работе в схему, изображенную на рис. 9, включают на место Z поочередно комбинации нагрузок, изображенные на рис. 10, и производят измерения P_a , $I_{эф}$ и $V_{эф}$.

По результатам этих измерений вычисляют $\cos \varphi$, P_r , Z , R и реактивное сопротивление цепи. Результаты измерений и вычислений оформляют в виде таблицы.

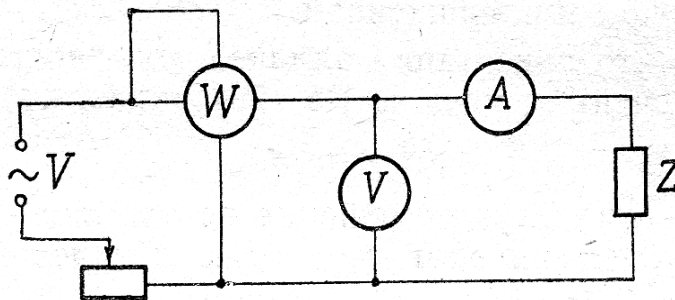


Рис. 9

Затем необходимо исследовать зависимость $\cos \varphi$ от величины индуктивного сопротивления цепи, показанной на рис. 10, д. Используемая в работе индуктивность изготовле-

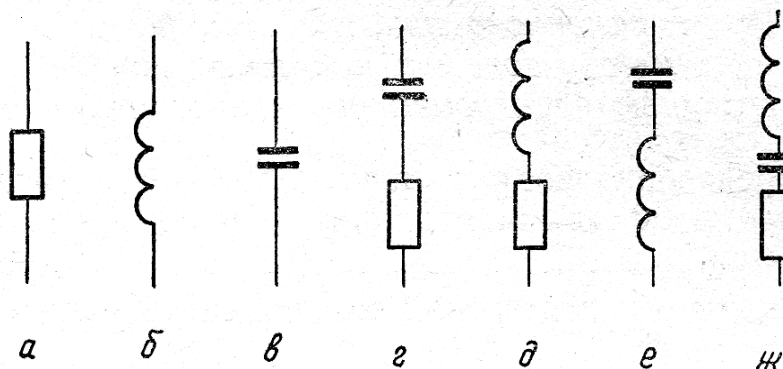


Рис. 10

на в виде катушки с выдвижным железным сердечником. Для выполнения этого упражнения силу тока доводят до 2—3 А и в катушку постепенно вдвигают железный сердечник. Для каждого положения сердечника вышеописанным способом определяют значение $\cos \varphi$, индуктивное и активное сопротивления катушки по измеренным значениям $V_{эф}$, $I_{эф}$ и P . Результаты оформляют в виде таблицы, а затем строят график зависимости $\cos \varphi$ от $\omega L/R$.

Примечания. 1. В схеме имеются вспомогательные реостаты. При первом включении каждого нового варианта схемы эти реостаты должны быть полностью введены.

2. Большой ток следует включать на короткие промежутки времени, так как нагревание катушки индуктивности будет вызывать изменение ее омического сопротивления.

3. Расчет погрешностей произвести, исходя из расчетных формул для $\cos \phi$, L и C и класса точности используемых при измерениях приборов.

Упражнение 2. Измерение сдвига фаз в цепи переменного тока с помощью осциллографа

Для измерения сдвига фаз с помощью осциллографа используется схема, изображенная на рис. 11. Пунктиром на ней обведены детали, смонтированные на отдельной плате.

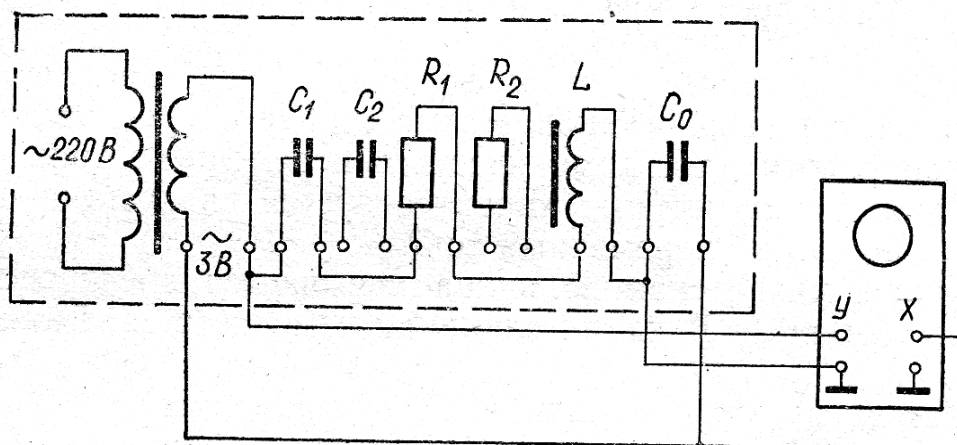


Рис. 11

Питание осуществляется переменным током промышленной частоты через понижающий трансформатор. В работе применяется электронный осциллограф, который должен работать при выключенной временной развертке; при использовании осциллографа ОМЛ следует нажать кнопку «Вх. Х».

Исследуемым участком цепи переменного тока являются последовательно соединенные конденсатор C , сопротивление R и катушка индуктивности L . Каждый из этих элементов схемы может быть закорочен.

Перед началом измерений устанавливают светящуюся точку на экране осциллографа на его середину так, чтобы

она совпадала с точкой пересечения средних линий на координатной сетке. Однако нельзя долго держать яркую точку на одном месте, так как это портит экран осциллографической трубки. Затем включают трансформатор.

Действуя ручками и кнопками управления осциллографа, получают на экране эллипс, растянутый в том или ином направлении, удобном для измерения его размеров.

Для определения величины сдвига фаз φ по формуле (30) необходимо измерить величины x и x_m . Величину $2x$ измеряют непосредственно на эллипсе как отрезок его секущей; для измерения x_m отключают от схемы и входа горизонтальных пластин осциллографа соединяющий их проводник и измеряют длину получившейся на экране горизонтальной прямой.

Измерения проводятся при различных вариантах закорачивания элементов схемы R , L и C . Результаты измерений и вычислений сводятся в таблицу.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ

1. Какой ток называется переменным? Какой переменный ток называется квазистационарным? Запишите условие квазистационарности для гармонического переменного тока.

2. Какими параметрами характеризуется квазистационарный гармонический переменный ток?

3. Какая физическая величина называется емкостью (емкостью)? В каких единицах измеряется емкость?

Какая физическая величина называется коэффициентом самоиндукции (индуктивностью)? В каких единицах измеряется индуктивность?

4. Почему емкость и индуктивность называют «энергоемкими элементами»?

4. При каких условиях в цепи переменного тока возникает сдвиг фаз между током и напряжением? Каким соотношением определяется сдвиг фаз в цепи, состоящей из последовательно соединенных R , L и C ?

5. Какая величина называется мгновенной мощностью в цепи переменного тока? Какая величина называется средним значением мощности?

6. Постройте зависимости мгновенной мощности от времени в цепи, содержащей только R , только L , только C . Чему равны средние значения мощности в каждом из этих случаев?

7. Какие величины называются эффективными значениями переменного тока и напряжения? Как связаны эффективные значения тока и напряжения с амплитудами этих величин в случае гармонического изменения тока и напряжения?

8. Какая мощность в цепи переменного тока называется активной? Как связана активная мощность с $V_{эф}$, $I_{эф}$ и сдвигом фаз φ ? Что происходит с активной мощностью в цепи?

9. Какая мощность в цепи переменного тока называется реактивной? Как связана реактивная мощность с $V_{эф}$, $I_{эф}$ и сдвигом фаз φ ? Что происходит с реактивной мощностью в цепи?

10. Расскажите о принципе работы ваттметра электродинамической системы.

11. Нарисуйте схему, позволяющую определить в цепи переменного тока сдвиг фаз между током и напряжением с помощью электроизмерительных приборов. Какие еще параметры цепи можно определить с помощью такой схемы?

12. Нарисуйте схему, позволяющую измерить в цепи переменного тока активную мощность и сдвиг фаз между током и напряжением с помощью осциллографа. Выведите формулы для определения активной мощности и сдвига фаз с помощью такой схемы.

ЛИТЕРАТУРА

Калашников С. Г. Электричество. М., 1970. § 35, 39, 101, 105, 108, 245—249, 252.

Савельев И. В. Курс общей физики. М., 1970, т. 2, § 24, 29, 55, 59, 61, 92—96.

Сивухин Д. В. Общий курс физики. М., 1977, т. 3, § 129, 131.