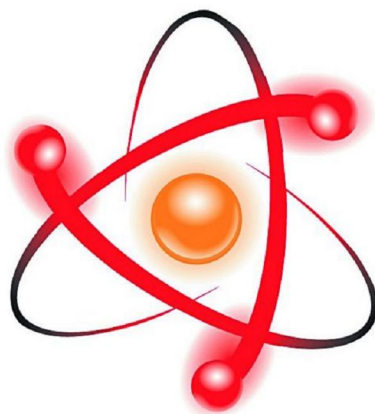


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



ЭЦСТ-1

**ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ
СОЕДИНЕНИИ R, L И C.**

ЧАСТЬ II

Тула, 2012 г

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ R , L И C .

Цель работы: изучение цепей переменного тока, экспериментальная проверка закона Ома для цепи переменного тока с последовательно соединенным активным сопротивлением, емкостью и индуктивностью, построение амплитудно-частотных характеристик колебательных контуров с последовательным соединением R , L и C .

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

ЧАСТЬ II

ЧАСТЬ II

ИЗМЕРЕНИЕ ИМПЕДАНСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

Переменный электрический ток.

Переменным называется ток, который с течением времени изменяет свою величину или направление.

В промышленности наибольшее распространение получил синусоидальный переменный ток, то есть ток, величина которого изменяется со временем по закону синуса или косинуса:

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

где I_m - амплитуда тока, $\Phi = (\omega t + \varphi_0)$ - фаза колебаний, φ_0 - начальная фаза.

Синусоидальный переменный ток имеет целый ряд преимуществ перед постоянным током, что и объясняет его использование в промышленности и в быту:

1. от генератора постоянного тока получить высокие напряжения практически невозможно,
2. генератор и двигатель переменного тока значительно проще по конструкции, надёжнее и дешевле генератора и двигателя постоянного тока,
4. при необходимости переменный ток можно преобразовать в постоянный ток,
5. переменный ток можно трансформировать, то есть повышать или понижать его напряжение с помощью трансформаторов.

В цепях переменного тока, кроме процессов нагрева проводов имеются дополнительные процессы, обусловленные изменяющимися магнитными и электрическими полями. Изменение этих полей оказывает влияние на величину и форму тока в цепи и может приводить к дополнительным потерям энергии. Величина и форма кривой силы тока зависят не только от параметров электрической цепи, но и от частоты и формы кривой приложенного на-

пряжения. Поэтому анализ явлений, происходящих в цепях переменного тока, вследствие этого значительно усложняются.

Электромагнитные возмущения распространяются по цепи со скоростью света в вакууме. Если за время, необходимое для передачи электромагнитного возмущения в самую отдалённую точку электрической цепи, величина тока не успевает значительно измениться, то мгновенные значения тока во всех сечениях цепи будут практически одинаковыми. (Токи, удовлетворяющие такому условию, называются квазистационарными.)

Квазистационарным называется переменный ток, который во всех сечениях неразветвлённой электрической цепи имеет одинаковую силу тока.

К мгновенным значениям квазистационарных токов можно применять законы Ома и правила Кирхгофа (однако при этом необходимо учитывать возникающую при изменении тока ЭДС электромагнитной индукции).

Основные характеристики переменного синусоидального электрического тока.

Мгновенными значениями силы тока i , напряжения u , ЭДС и мощности p в цепях переменного тока называют их значения в данный момент времени.

Амплитудными значениями силы тока I_m , напряжения U_m , ЭДС \mathcal{E}_m и мощности P_m в цепях переменного тока называют наибольшие мгновенные значения этих величин в случае синусоидального переменного тока за период.

Периодом T называется наименьший промежуток времени, через который переменный ток повторяет свои значения в той же самой последовательности (рис. 1).

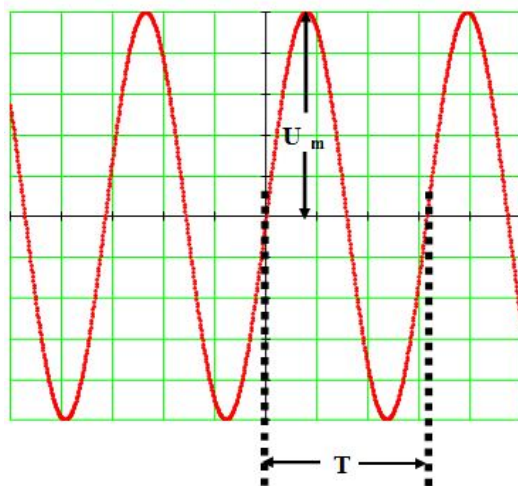


Рис. 1. Амплитудное значение напряжения U_m и период T сигнала.

Частотой ν переменного периодического тока называется величина обратная периоду:

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad [\nu] = \text{Гц}, \text{ Герц} \quad (2)$$

Циклической или круговой частотой называют величину:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu, \quad [\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \text{ радиан на секунду} \quad (3)$$

Сила тока и напряжение переменного тока непрерывно изменяются по величине, поэтому возникла необходимость каким-либо образом сравнивать различные токи друг с другом. При этом необходимо использовать такое действие переменного тока, которое бы не зависело от его направления. В этом отношении наиболее удобным оказалось тепловое действие тока. Причём по тепловому действию тока можно сравнивать переменные токи с постоянными. В связи с этим возникло понятие эффективного значения переменного тока.

Эффективным (действующим, среднеквадратичным) значением переменного тока $I_{\text{эфф}}$ называется такая величина силы постоянного тока, который оказывал бы в цепи такое же тепловое воздействие за время одного периода. По определению:

$$I_{\text{действ}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (4)$$

$$U_{\text{действ.}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

Поясним запись формулы (4). Пусть резистор R подключен к источнику постоянного напряжения, например батареи E (рис. 2). В течение времени T , равное периоду переменного напряжения в нем выделится количество теплоты равное:

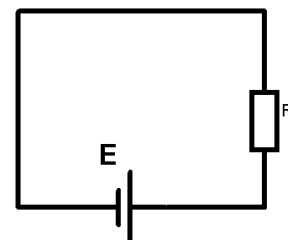


Рис.2

$$Q = P \cdot T = I^2 RT \quad (5)$$

Подключим теперь этот резистор в цепь переменного тока. Количество теплоты, выделенное переменным током за время dt равно dQ :

$$dQ = i(t) R dt$$

а за период T :

$$Q = dQ = \int_0^T i^2(t) R dt \quad (6)$$

Приравнявая (6) и (5) получим:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

Для синусоидального тока рис. 1, проводя интегрирование, получим:

$$I_{эфф} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad U_{эфф} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

Как правило, все измерительные приборы в электрических цепях отградуированы в действующих значениях величин.

Все элементы электрической цепи обладают сопротивлением. Различают два вида сопротивления: активное и реактивное. Если при прохождении тока через элемент цепи происходит только необратимое превращение электрической энергии в теплоту, то сопротивление такого участка цепи называют активным. Если такого превращения не происходит, то сопротивление называют реактивным.

Элемент цепи с активным сопротивлением называется резистором. Реактивным сопротивлением – емкостным и индуктивным – обладают соответственно конденсаторы и катушки индуктивности.

Наличие реактивных сопротивлений в цепи переменного тока приводит к тому, что возникает разность фаз между изменениями напряжения и тока в цепи (то есть ток и напряжение не одновременно достигают своего максимального значения). Это обстоятельство значительно усложняет расчёты цепей переменного тока.

Сопротивлением участка цепи постоянного тока называют величину равную:

$$R = \frac{U}{I} \quad (8)$$

Сопротивлением участка цепи переменного тока называют величину равную:

$$R = \frac{U_{эфф}}{I_{эфф}} = \frac{U_m}{I_m} \quad (10)$$

Математическое описание переменного тока можно осуществить тремя методами:

- аналитический метод (с помощью тригонометрических функций),
- символический метод (с помощью комплексных чисел),
- метод векторных диаграмм (используется графический метод описания переменного тока).

Аналитический метод описания синусоидальных токов иногда приводит к громоздким математическим преобразованиям при определении каких-либо величин. Поэтому для упрощения расчётов в этих случаях были придуманы другие методы вычислений, которые мы сейчас рассмотрим.

Метод векторных диаграмм

Гармонические колебания допускают наглядную графическую интерпретацию. Ее смысл состоит в том, что каждому гармоническому колебанию с частотой ω_0 можно поставить в соответствие вращающийся с угловой скоростью ω_0 вектор, длина которого равна амплитуде s_0 а его начальное (стартовое) положение задается углом φ_0 совпадающим с начальной фазой (рис. 3).

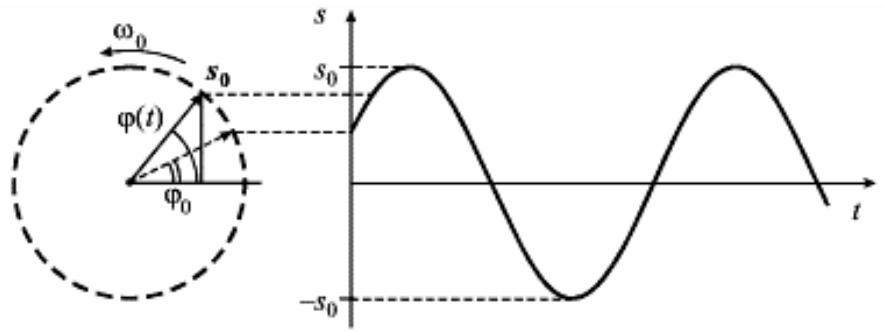


Рис.3. Графическое описание колебаний с помощью метода векторных диаграмм

Вертикальная проекция вектора s_0 изменяется со временем:

$$s(t) = s_0 \sin \varphi(t) \quad (11)$$

Мгновенное положение вектора s_0 определяется углом $\varphi(t)$ - фазой:

$$\varphi(t) = \omega_0 t + \varphi_0 \quad (12)$$

При угловой скорости (круговой частоте) ω_0 вектор совершает $\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ оборотов (циклов) в секунду, а продолжительность одного оборота (период) равна отношению угла 2π к угловой скорости ω_0 : $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$.

С помощью векторных диаграмм легко осуществить сложение гармонических колебаний. Так, если необходимо сложить два гармонических колебания с одинаковыми частотами:

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) = s_{01} \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + s_{02} \sin(\omega_0 t + \varphi_2) = s_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (13)$$

то амплитуду s_0 и начальную фазу φ_0 суммарного колебания $s(t)$ с той же частотой ω_0 можно легко рассчитать из рис. 4а, на котором графически изображена операция сложения векторов $\vec{s}_0 = \vec{s}_{01} + \vec{s}_{02}$ в момент времени $t=0$.

$$s_0 = \sqrt{(s_{01} \cos \varphi_1 + s_{02} \cos \varphi_2)^2 + (s_{01} \sin \varphi_1 + s_{02} \sin \varphi_2)^2}$$

$$\varphi_0 = \arctg \left(\frac{s_{01} \sin \varphi_1 + s_{02} \sin \varphi_2}{s_{01} \cos \varphi_1 + s_{02} \cos \varphi_2} \right) \quad (14)$$

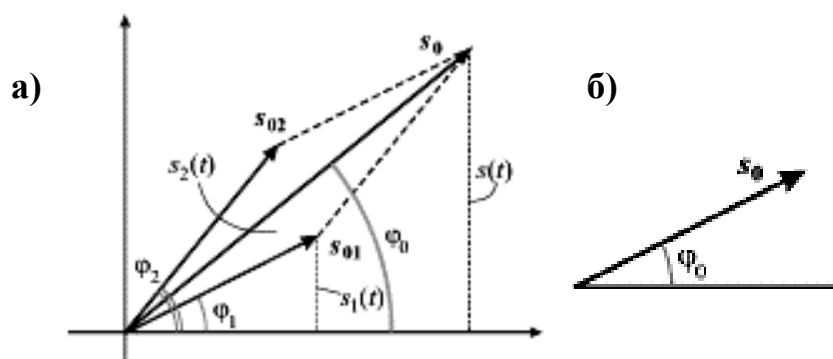


Рис.4. Графическое сложение гармонических колебаний.

Ясно, что вертикальная проекция вектора s_0 будет также изменяться по гармоническому закону с частотой ω_0 поскольку взаимное расположение векторов s_{01} и s_{02} не изменяется с течением времени.

Из этой диаграммы наглядно видно, что суммарное колебание $s(t)$ опережает по фазе колебание $s_1(t)$ и отстает по фазе от колебания $s_2(t)$. Полная фаза для каждого из трех колебаний в произвольный момент времени отличается от их начальных фаз на одну и ту же величину $\omega_0 t$ которую при построении векторных диаграмм не учитывают. При этом колебание изображается неподвижным вектором (рис. 4б), а частота колебания предполагается известной.

Этот метод очень удобен при сложении двух или нескольких гармонических колебаний, так как в этом случае громоздкие тригонометрические преобразования можно заменить простым сложением векторов.

Используя идеи этого метода, для различных цепей синусоидального тока строят свои диаграммы, на которых одновременно в виде векторов изображают напряжения и токи в цепи, а по ним определяют сдвиг по фазе между изменениями тока и напряжения, а также ряд других характеристик цепи.

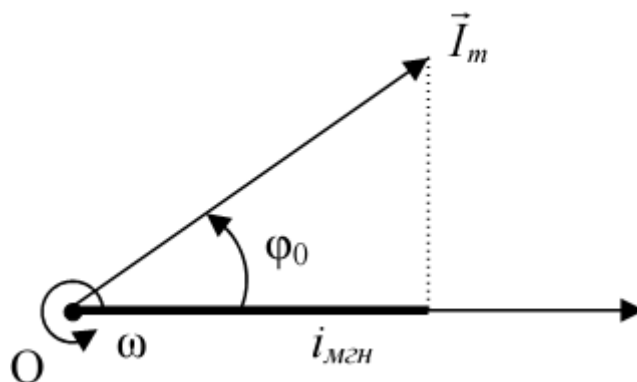


Рис.5. Графическое изображение синусоидального тока на векторной диаграмме.

Символический метод описания синусоидального тока.

Идея этого метода заключается в записи гармонических колебаний $i = I_m \cos(\omega t + \varphi_0)$ в комплексном виде:

$$\dot{I} = I_m e^{j(\omega t + \varphi_0)}, \quad \text{где } j = \sqrt{-1} - \text{мнимая единица.} \quad (15)$$

Согласно формуле Эйлера $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$ поэтому комплексное уравнение (15) можно записать в виде:

$$\dot{I} = I_m e^{j(\omega t + \varphi_0)} = I_m [\cos(\omega t + \varphi_0) + j \sin(\omega t + \varphi_0)]. \quad (16)$$

При анализе такой записи предполагается, что вещественная часть уравнения (16) представляет собой уравнение гармонического колебания $i = I_m \cos(\omega t + \varphi_0)$. Таким образом, величина силы тока, записанной в форме уравнения (15), в любой момент времени определяется вещественной частью этого уравнения.

Этот метод очень удобен при умножении и дифференцировании уравнений гармонических колебаний, так как в этом случае громоздкие тригонометрические преобразования можно заменить простым действиями над показательными функциями.

Как отмечалось ранее, расчёт цепей переменного тока значительно усложняется по сравнению с цепями постоянного тока из-за наличия в них реактивного сопротивления.

Ниже мы более подробно рассмотрим особенности работы некоторых цепей переменного синусоидального тока.

Цепь переменного тока только с активным сопротивлением.

Пусть напряжение в сети изменяется по закону:

$$u = U_m \sin(\omega t) \quad (17)$$

Тогда по закону Ома можем записать:

$$i = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \quad (18)$$

где $I_m = \frac{U_m}{R}$ - закон Ома для цепи переменного тока только с активным сопротивлением.

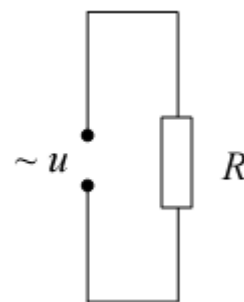


Рис.6. Цепь переменного тока с активным сопротивлением.

Из уравнений (17) (18) следует, что:

$$\begin{cases} u = U_m \sin(\omega t) \\ i = I_m \sin(\omega t) \end{cases}$$
 - т. е. разность фаз между изменениями тока и напряжения в такой цепи равна нулю (см. рис. 7).

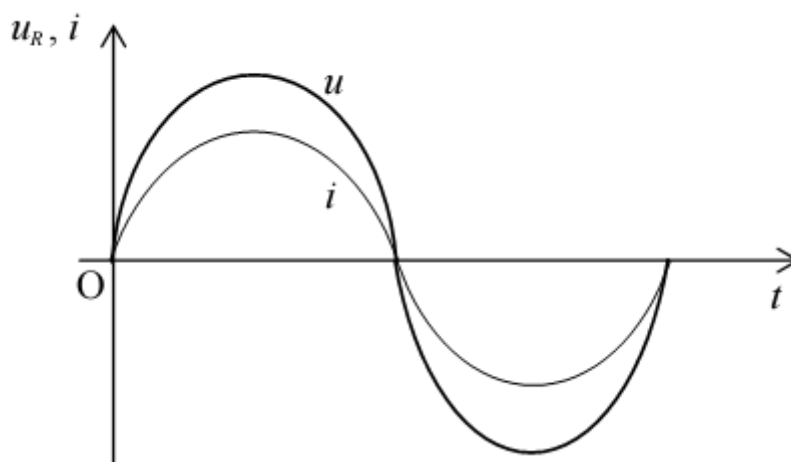


Рис.7. Графики тока и напряжения в цепи переменного тока, содержащей только активное сопротивление.

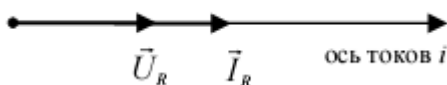


Рис.8. Векторная диаграмма цепи рис. 6

Цепь переменного тока только с идеальной индуктивностью. ($R=0$, $C=0$)

Рассмотрим цепь переменного тока на рис. 8. Пусть внешнее ЭДС в цепи меняется по закону $\varepsilon = \mathcal{E}_m \sin \omega t$. При протекании через катушку переменного тока, в ней по закону Фарадея возникает ЭДС самоиндукции $\varepsilon_s = -L \frac{di}{dt}$. С учетом того, что сопротивление катушки равно нулю, по второму правилу Кирхгофа можно записать:

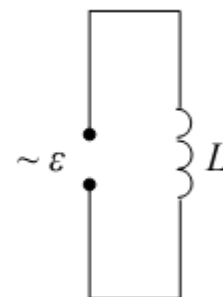


Рис.8. Цепь переменного тока с индуктивностью.

$$0 = \varepsilon + \varepsilon_s \text{ или } \varepsilon = -\varepsilon_s \Rightarrow \varepsilon = L \frac{di}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{\varepsilon}{L} = \frac{\mathcal{E}_m}{L} \sin \omega t .$$

Таким образом, имеем:

$$i = \int_0^{\infty} \frac{\mathcal{E}_m}{L} \sin \omega t dt = -\frac{\mathcal{E}_m}{\omega L} \cos \omega t + Const = \frac{\mathcal{E}_m}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + Const.$$

При отсутствии составляющей постоянного тока $Const=0$. Тогда окончательно получим:

$$i = \frac{\mathcal{E}_m}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}). \quad (19)$$

Если внутренне сопротивление источника ЭДС пренебрежимо мало, то он создает на входе цепи напряжение, равное его ЭДС. В этом случае напряжение на катушке индуктивности будет меняться по закону:

$$u = U_m \sin(\omega t) \quad (20)$$

и уравнение (19) можно переписать в виде:

$$i = \frac{U_m}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (21)$$

где $I_m = \frac{U_m}{\omega L}$ - закон Ома для цепи переменного тока с идеальной индуктивностью. Из уравнения (21) следует, что роль сопротивления в такой цепи играет величина:

$$X_L = \omega L, \text{ называемая реактивным индуктивным сопротивлением. } [X_L] = \text{Ом}.$$

Из уравнений (20) (21) следует, что:

$$\begin{cases} u = U_m \sin(\omega t) \\ i = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases} \text{ - т. е. в такой цепи ток отстает по фазе от напряжения}$$

на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 9 а, б).

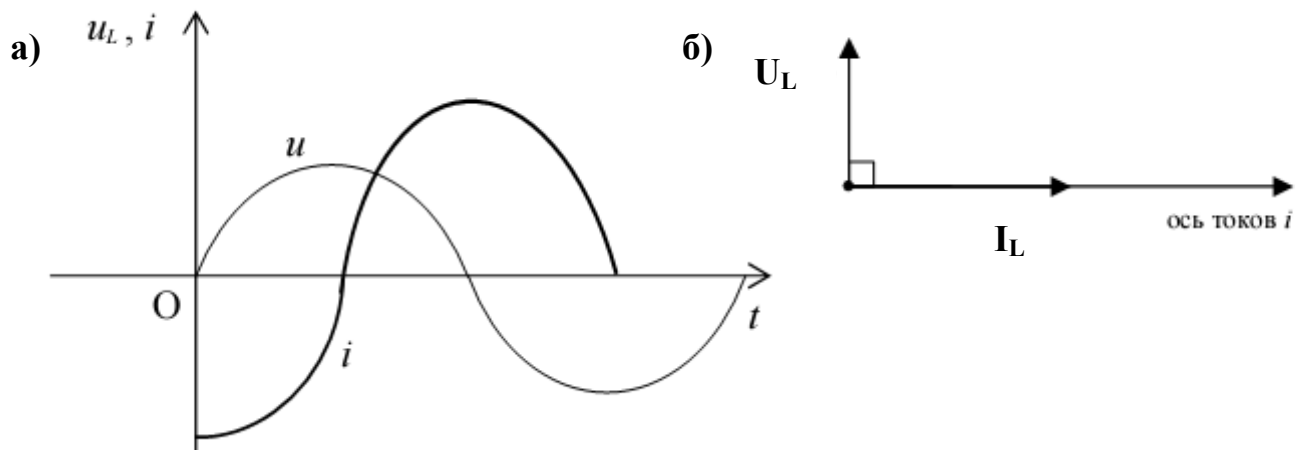


Рис.9 Графики тока и напряжения в цепи переменного тока, содержащей только индуктивность а) и векторная диаграмма цепи б)

Физически это явление можно объяснить следующим образом: при изменении напряжения на катушке в ней возникает ЭДС самоиндукции, которая направлена так, что препятствует изменению тока, текущего по катушке. В результате этого явления появляется сдвиг фаз между изменением напряжения на индуктивности и силой тока в цепи.

Цепь переменного тока только с идеальной емкостью.

$$(R=0, L=0)$$

Рассмотрим электрическую цепь на рис. 10. Будем считать, что емкость в цепи является идеальной, т. е. $R=0, L=0$. Пусть напряжение в цепи меняется по закону:

$$u = U_m \sin(\omega t). \quad (22)$$

Мгновенное значение силы тока в такой цепи с ёмкостью равно скорости изменения заряда на обкладках конденсатора $i = \frac{dq}{dt}$. Так как $q = Cu$, то можно записать:

$$i = \frac{dCu}{dt} = C \frac{du}{dt} = \frac{dU_m \sin \omega t}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (23)$$

где $I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{1/\omega C}$ - закон Ома для цепи переменного тока с идеальной ёмкостью.

Из этого следует, что роль сопротивления в цепи играет величина:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \text{ называемая реактивным емкостным сопротивлением. } [X_C] = \text{Ом.}$$

Из сравнения (22) и (23) следует, что:

$$\begin{cases} u = U_m \sin \omega t \\ i = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{cases} \text{ - то есть в такой цепи ток опережает по фазе напряжение на } \frac{\pi}{2}$$

График напряжения и тока в данной цепи, а также векторная диаграмма представлены на рис 11.

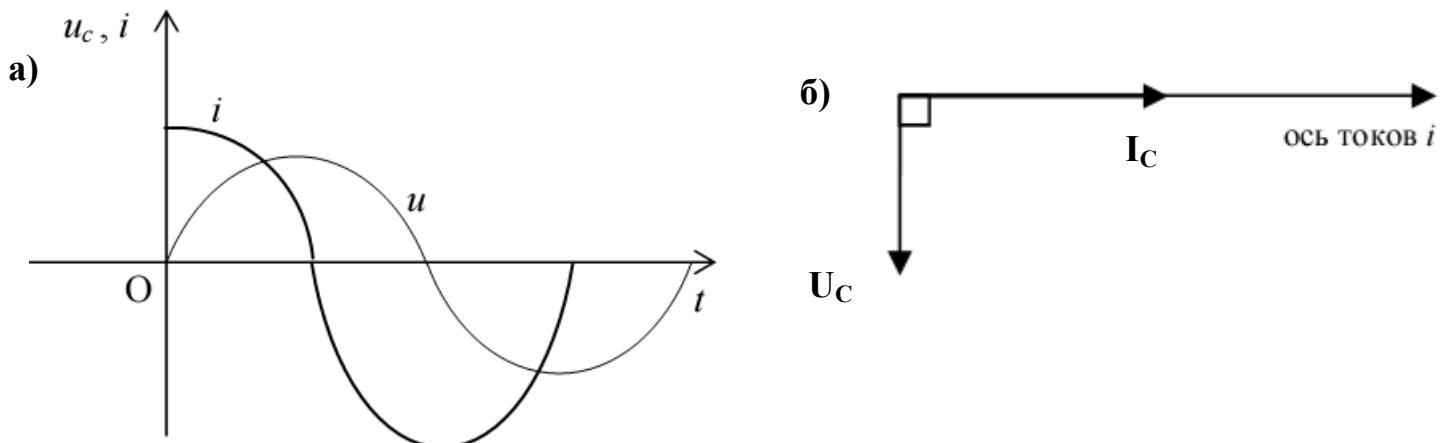


Рис.11 Графики тока и напряжения в цепи переменного тока, содержащей только идеальную ёмкость а) и векторная диаграмма цепи б)

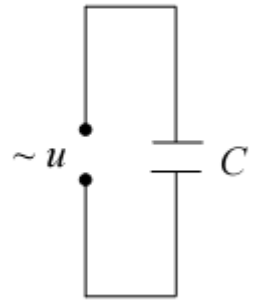


Рис.10. Цепь переменного тока с идеальной ёмкостью.

Цепь переменного тока с последовательно включенными R , L , C .

Перейдем теперь к анализу полной электрической цепи с последовательно включенными активным сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C , исследуемой в данной работе (рис. 12).

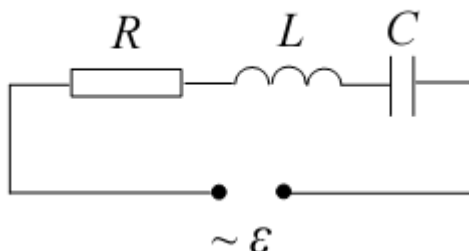


Рис.12. Цепь переменного тока с последовательно соединенными R , L , C

Пусть ЭДС в цепи меняется по гармоническому закону:

$$\varepsilon = \mathcal{E}_m \cos \omega t \quad (24)$$

В результате чего в цепи потечет электрический ток:

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (25)$$

Определим амплитуду I_m и сдвиг фаз φ между током и внешней ЭДС, если известны параметры цепи R , L , C . На основании второго закона Кирхгофа для данной цепи запишем:

$$u_R + u_C = \varepsilon + \varepsilon_s, \quad (26)$$

Т. е. сумма падений напряжений на отдельных элементах контура равна в каждый момент времени сумме ЭДС, действующих в контуре.

Для любого момента времени t справедливы следующие соотношения:

$$u_R = iR \quad R = \text{const}; \quad (27)$$

$$u_C = \frac{1}{C} q = \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad C = \text{const}; \quad (28)$$

$$\varepsilon_s = -L \frac{di}{dt} \quad L = \text{const}, \quad (29)$$

где R – сопротивление резистора, C – емкость конденсатора, L – индуктивность катушки, u_R и u_C – напряжения на соответствующих элементах цепи, i – ток в цепи, q – заряд конденсатора, $\varepsilon_s = -L \frac{di}{dt}$ – ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке индуктивности при прохождении через неё переменного тока. Подставим (27), (28), (29) в (26).

Получим: $iR + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = \varepsilon - L \frac{di}{dt}$. Следовательно:

$$iR + \frac{1}{C} \int_0^t i dt + L \frac{di}{dt} = \varepsilon. \quad (30)$$

Далее, подставляя в (30) выражения (24) (25):

$$I_m R \cos(\omega t - \varphi) + \frac{1}{C} \int_0^t I_m \cos(\omega t - \varphi) dt + L \frac{dI_m \cos(\omega t - \varphi)}{dt} = \mathcal{E}_m \cos \omega t$$

После выполнения операций интегрирования и дифференцирования получим:

$$I_m R \cos(\omega t - \varphi) + I_m \frac{1}{\omega C} \sin(\omega t - \varphi) - I_m \omega L \sin(\omega t - \varphi) = \mathcal{E}_m \cos \omega t.$$

Воспользуемся известными тригонометрическими соотношениями:

$$\sin(\omega t - \varphi) = \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}), \quad -\sin(\omega t - \varphi) = \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}),$$

преобразуем выражение к окончательному виду:

$$I_m R \cos(\omega t - \varphi) + \frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}) + I_m \omega L \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) = \mathcal{E}_m \cos \omega t. \quad (31)$$

Из анализа (31) можно сделать следующие выводы:

- Напряжение на резисторе u_R совпадает по фазе с током в цепи i .
- Напряжение на ёмкости u_C отстает по фазе от тока i на угол $\frac{\pi}{2}$.
- Напряжение на индуктивности u_L опережает ток i на угол $\frac{\pi}{2}$.

Из этого же уравнения следует, что:

$$U_R = I_m R, \quad U_C = I_m \frac{1}{\omega C} \quad \text{и} \quad U_L = I_m \omega L. \quad (32)$$

Уравнение (31) позволяет определить амплитуду результирующего тока I_m , сдвиг фаз между током в цепи и изменением внешней ЭДС, а также полное сопротивление цепи Z , изображенной на рис. 10.

Учитывая уравнения (32) перепишем (31) в виде:

$$U_R \cos(\omega t - \varphi) + U_C \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}) + U_L \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) = \mathcal{E}_m \cos \omega t \quad (33)$$

Далее, используя метод векторных диаграмм, представим каждое слагаемое (33) в виде векторов \vec{U}_R , \vec{U}_C , \vec{U}_L и $\vec{\mathcal{E}}_m$.

Запишем это уравнение как сумму трех векторов, каждый из которых описывает изменение напряжения на резисторе, емкости и индуктивности соответственно:

$$\vec{U}_R + \vec{U}_C + \vec{U}_L = \vec{\mathcal{E}}_m.$$

Так как R, L и C соединены последовательно, то через них протекает одинаковый по величине ток, поэтому в качестве основной оси отсчёта на векторной диаграмме выберем ось токов. Тогда, учитывая сдвиги фаз, возникающие между током и напряжениях на ёмкости и индуктивности, векторная диаграмма для нашей цепи будет иметь вид рис. 13.

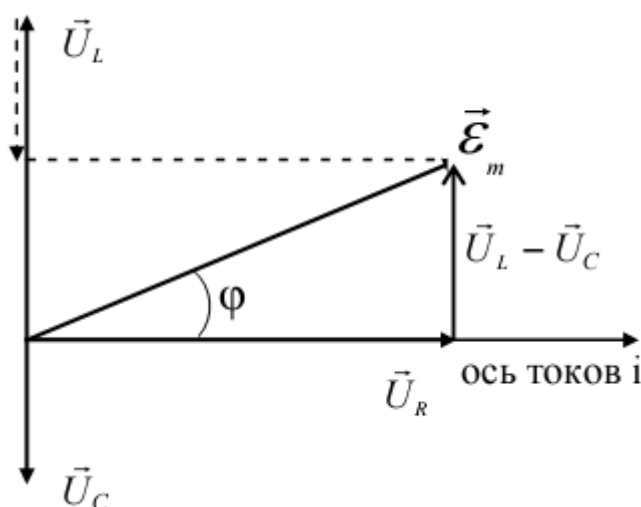


Рис.13. Векторная диаграмма цепи переменного тока с последовательно соединенными R, L, C

Из рис. 9. по теореме Пифагора имеем:

$$\mathcal{E}_m = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

или

$$\mathcal{E}_m = \sqrt{I_m^2 R^2 + (I_m \omega L - \frac{I_m}{\omega C})^2}.$$

Вынося I за знак корня получим:

$$\mathcal{E}_m = I_m \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}.$$

Таким образом, окончательно имеем:

$$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{\mathcal{E}_m}{Z} \text{ - закон Ома для переменного тока с последовательно соединёнными } R, L \text{ и } C.$$

Величина $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ называется **полным сопротивлением** электрической цепи или **импедансом** $[Z] = \text{Ом}$. Сдвиг фаз φ между внешней ЭДС генератора и силой тока i можно найти из векторной диаграммы рис. 10:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$