

Московский государственный строительный
университет



Кафедра электротехники и электропривода

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Часть 1. Электрические и магнитные цепи. Электрические измерения

Лекция 3. Однофазная цепь с последовательным соединением электроприемников

Электронные лекции

Составитель:

профессор И.Г. Забора

Москва – 2014 г.

Лекцию читает

**профессор кафедры «Электротехника и
электропривод» МГСУ**

Забора Игорь Георгиевич

E-mail: izabora@yandex.ru

Однофазный переменный ток



Цепь с последовательным соединением R,L,C-элементов

Рассмотрим цепь переменного тока с последовательным соединением резистора R , индуктивности L и конденсатора C или иначе – неразветвленная цепь с R,L,C -элементами, к которой приложено синусоидальное напряжение питания $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, равное ЭДС источника $e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$.

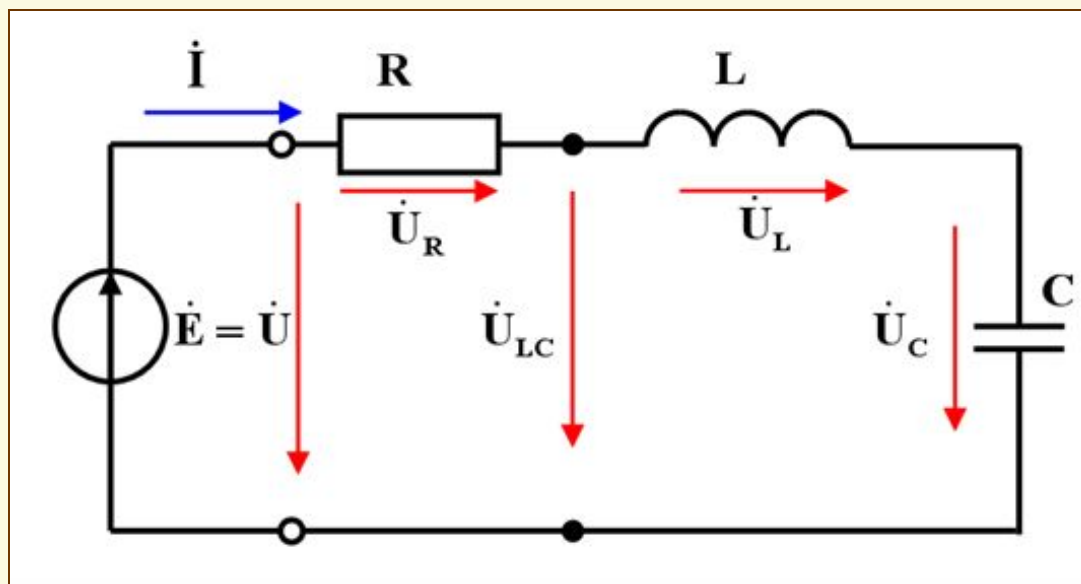


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения цепи синусоидального тока с последовательным соединением R,L,C -элементов

Однофазный переменный ток



Цепь с последовательным соединением R,L,C-элементов

Согласно второму закону Кирхгофа комплексное напряжение \dot{U} , приложенное к входным зажимам цепи (см. рис.1), равно алгебраической (векторной) сумме комплексных напряжений $\dot{U}_R, \dot{U}_L, \dot{U}_C$ соответственно, на резистивном R , индуктивном L и емкостном C элементах:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Из схемы замещения видно, что на основании второго закона Кирхгофа можно составить еще два уравнения равновесия напряжений исследуемой цепи:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L,$$

$$\dot{U}_{LC} = \dot{U}_L + \dot{U}_C,$$

где \dot{U}_{LC} – комплексная (векторная) сумма комплексных напряжений на индуктивном X_L и емкостном X_C сопротивлениях.

Величины напряжений на сопротивлениях R, X_L, X_C этих элементов определяются по закону Ома для отдельных R, L, C -элементов цепи:

$$U_R = I_R R; \quad U_L = I_L X_L; \quad U_C = I_C X_C.$$

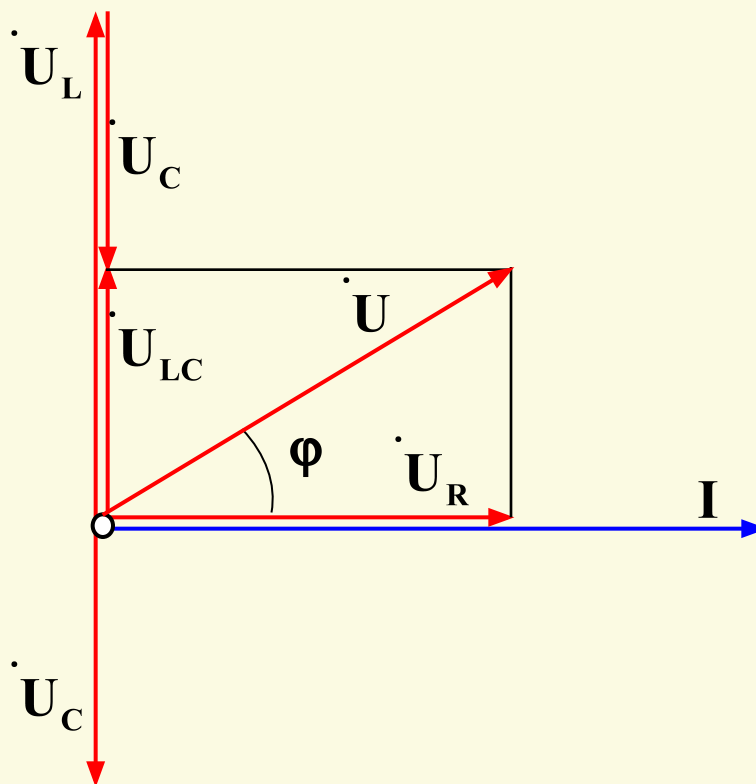
Однофазный переменный ток



Цепь с последовательным соединением R,L,C-элементов

Векторная диаграмма для однофазной цепи с последовательным соединением R,L,C-элементов строиться по правилам, подробно изложенным в электронном пособии по лабораторным работам [1].

Построение векторной диаграммы



Однофазный переменный ток

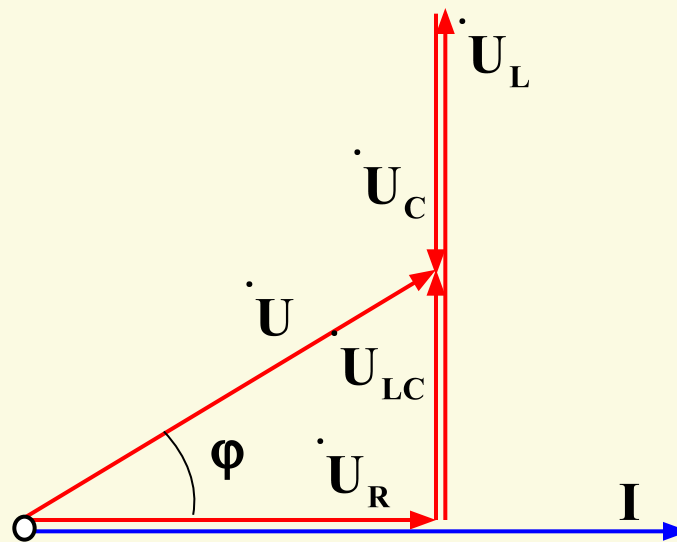


Цепь с последовательным соединением R,L,C-элементов

Была построена векторная диаграмма при откладывании векторов напряжений U_R , U_L , U_C *из общего начала*, когда $U_L > U_C$.

Ниже показано построение той же векторной диаграммы при откладывании *цепочки векторов* напряжений U_R , U_L , U_C .

Построение векторной диаграммы



Обе векторные диаграммы идентичны и построены для случая *активно-индуктивной нагрузки*, когда $U_L > U_C$.

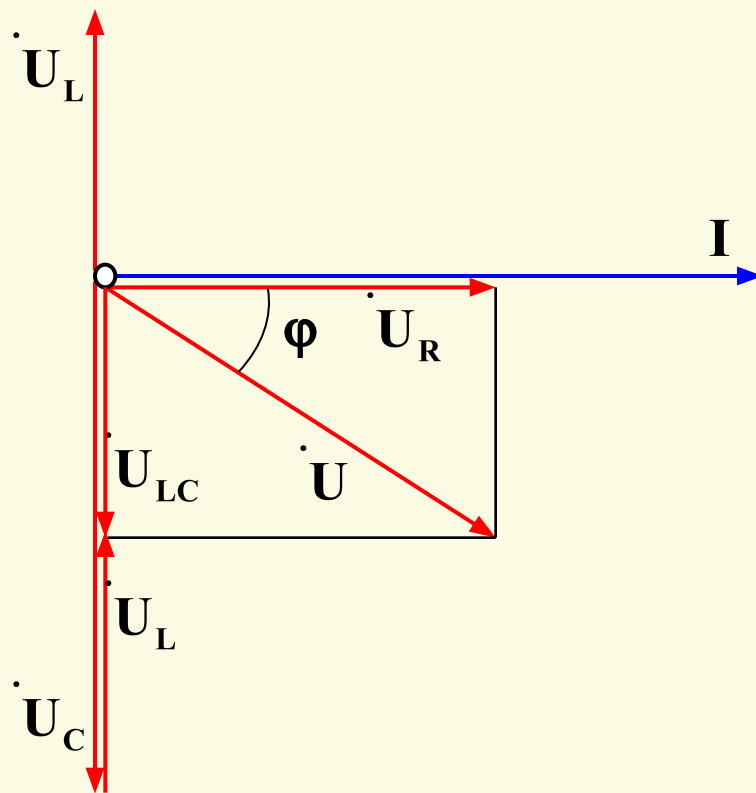
Однофазный переменный ток



Цепь с последовательным соединением R,L,C-элементов

Здесь показано построение векторной диаграммы при откладывании векторов напряжений \dot{U}_R , \dot{U}_L , \dot{U}_C из общего начала, когда $U_C > U_L$.

Построение векторной диаграммы



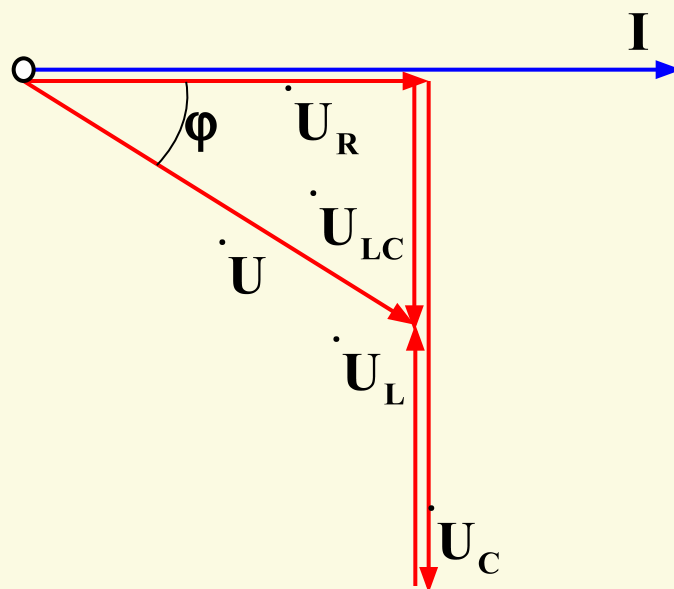
Однофазный переменный ток



Цепь с последовательным соединением R,L,C-элементов

Здесь показано построение предыдущей векторной диаграммы, когда $U_C > U_L$ при откладывании *цепочки векторов* напряжений U_R , U_L , U_C .

Построение векторной диаграммы



Две последние векторные диаграммы идентичны и построены для случая *активно-емкостной нагрузки*, когда $U_C > U_L$.

Однофазный переменный ток



Цепь с последовательным соединением R,L,C-элементов

На рисунке ниже показаны две ранее построенные векторные диаграммы при откладывании *цепочки векторов* напряжений $\dot{U}_R, \dot{U}_L, \dot{U}_C$.

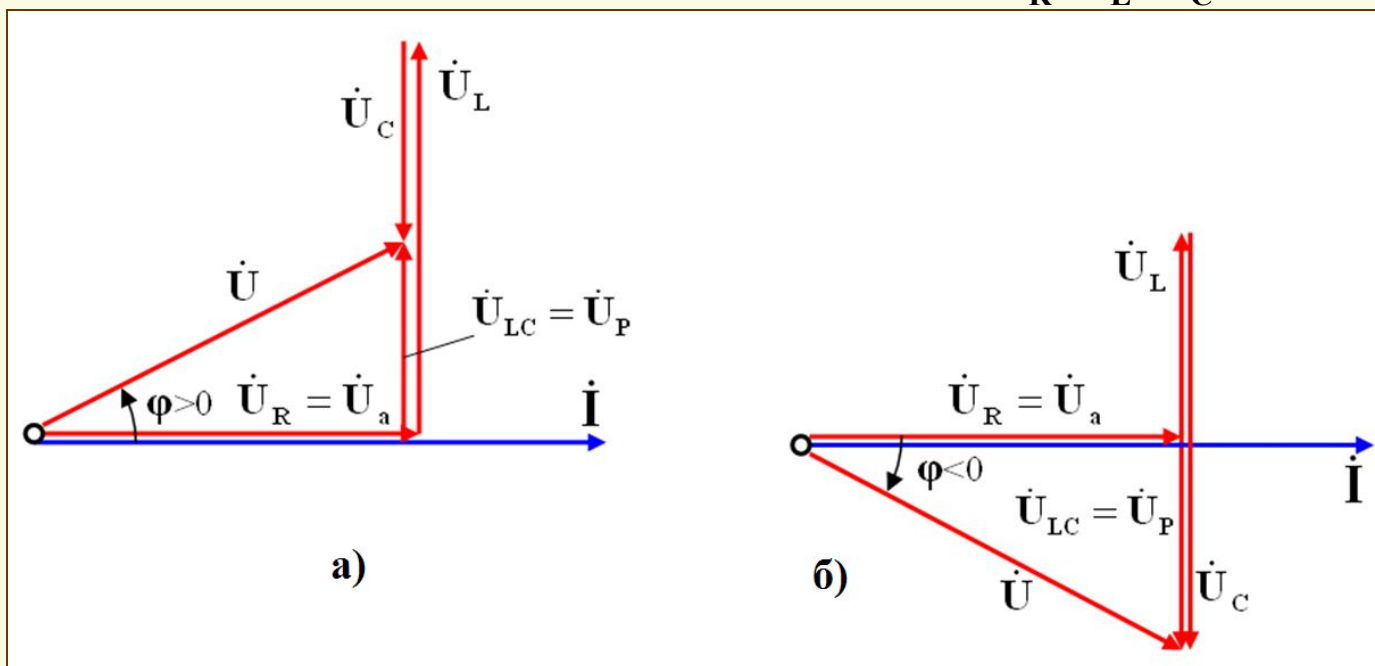


Рис. 2. Векторная диаграмма тока и напряжений для цепи с последовательным соединением R,L,C-элементов

а – активно-индуктивная нагрузка ($U_L > U_C$);

б – активно-емкостная нагрузка ($U_C > U_L$)

Однофазный переменный ток



Цепь с последовательным соединением R,L,C-элементов

Векторы напряжений U_R , U_{LC} , U на векторных диаграммах имеет вид прямоугольного треугольника (см. рис. 2). Гипотенуза треугольника напряжений равна **полному напряжению** U , а катеты треугольника $U_a = U_R = RI$ и $U_p = U_{LC} = |U_L - U_C| = |X_L - X_C|$ называют – **активной и реактивной составляющей** полного напряжения.

Вектор реактивной составляющей напряжения U_p опережает по фазе вектор тока I на угол $\pi/2$ при активно-индуктивной нагрузке (рис. 2,а) и отстает по фазе от тока на угол $\pi/2$ при активно-емкостной нагрузке (рис. 2,б).

Вектор полного напряжения U опережает по фазе вектор тока I на угол φ при активно-индуктивной нагрузке (рис. 2,а) и отстает по фазе от тока на угол φ при активно-емкостной нагрузке (рис. 2,б).

Из векторной диаграммы (рис. 2) легко получаются формулы, связывающие величины напряжений в последовательной цепи. Из теоремы Пифагора для прямоугольного треугольника векторов напряжений U_R , U_{LC} , U :

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2};$$

Однофазный переменный ток



Цепь с последовательным соединением R,L,C-элементов

$$U_a = U_R = U \cos \phi;$$

$$U_p = U_{LC} = |U_L - U_C| = U \sin \phi;$$

$$\cos \phi = U_R / U.$$

Если составляющие напряжений U , $U_a = U_R$, $U_{LC} = |U_L - U_C| = U_p$, образующие на векторной диаграмме прямоугольный треугольник напряжений

(см. рис. 2) разделить на ток I , то может быть получен подобный прямоугольный *треугольник сопротивлений* (см. рис. 3).

Стороны треугольника сопротивлений на основании закона Ома образуют: *полное сопротивление Z* – гипотенузу треугольника, *активное сопротивление R* – горизонтальный катет, *общее реактивное сопротивление X* – вертикальный катет.

Однофазный переменный ток



Цепь с последовательным соединением R,L,C-элементов

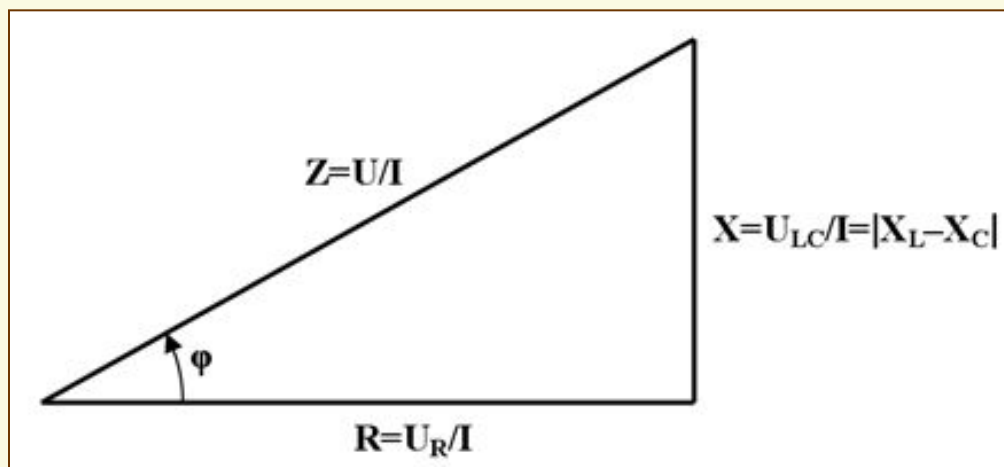


Рис3. Треугольник сопротивлений для цепи с последовательным соединением R,L,C-элементов

Из прямоугольного треугольника сопротивлений (рис. 3) легко выводятся формула полного сопротивления Z , а также формулы выражающие связь между сопротивлениями R , X , X_L и X_C :

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2};$$

Однофазный переменный ток



Расчет мощностей в цепи с R,L,C-элементами

$$R = Z \cos \varphi; \quad X = |X_L - X_C| = Z \sin \varphi; \quad \cos \varphi = R / Z.$$

Если составляющие напряжений U , $U_a = U_R$, $U_{LC} = |U_L - U_C| = U_P$, образующие на векторной диаграмме рис. 2. прямоугольный треугольник напряжений, умножить на ток I , то может быть получен подобный прямоугольный *треугольник мощностей*, как показано на рисунке ниже.

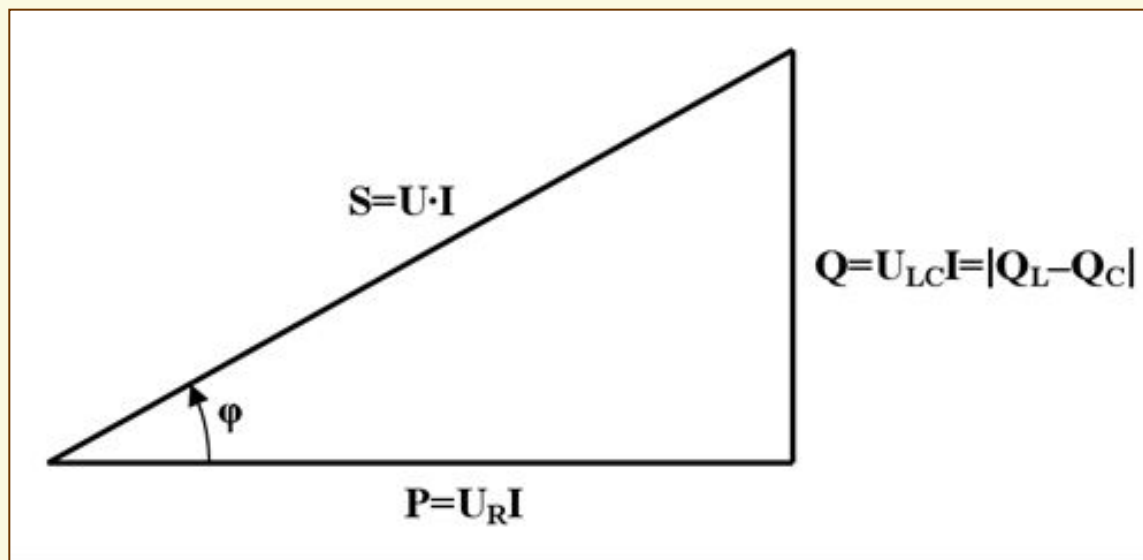


Рис. 4. Треугольник мощностей для цепи с R,L,C-элементами



Однофазный переменный ток



Расчет мощностей в цепи с R,L,C-элементами

Из треугольника мощностей видно, что активная мощность **P** равна: $P = S \cos \phi = UI \cos \phi$. Активная мощность выделяемая в резисторе с активным сопротивлением **R** также определяется из закона Ома по формулам:

$$P = U_R I = I^2 R = \frac{(U_R)^2}{R}.$$

Активная мощность в цепях синусоидального тока измеряется, как и в цепях постоянного тока – в *ваттах* (**Вт**) и *киловаттах* (**кВт**) или *мегаваттах* (**МВт**)

Активная мощность – это средняя за период мощность, выделяемая на резистивных элементах в цепи с синусоидальными напряжениями и токами.

Активная мощность характеризует интенсивность однонаправленной передачи энергии от источника к электроприемнику и ее необратимое преобразование в другие виды энергии, в частности, в тепловую энергию.

В этом заключается физическая сущность активной мощности.

Однофазный переменный ток



Расчет мощностей в цепи с R,L,C-элементами

Реактивная мощность Q обусловлена наличием в цепи индуктивности и (или) емкости и из треугольника мощностей (см. рис. 4) рассчитывается по формуле : $Q = S \sin \phi = UI \sin \phi$.

Реактивная мощность, связанная с реактивным сопротивлением $X = |X_L - X_C|$, из закона Ома определяется по формулам: $Q = I^2 X = I^2 |X_L - X_C|$.

Единица измерения реактивной мощности – **вольт-ампер реактивный (ВАр)** и в тысячу раз большая – **киловольт-ампер реактивный (кВАр)**.

Величина общей реактивной мощности цепи синусоидального тока с **R,L,C-элементами** равна модулю разности **реактивной индуктивной мощности** Q_L и **реактивной емкостной мощности** Q_C : $Q = |Q_L - Q_C|$.

Здесь **реактивная индуктивная мощность**, или просто – **индуктивная мощность** определяется по формулам:

$$Q_L = U_L I = \frac{U_L^2}{X_L} = I^2 X_L.$$

Реактивная емкостная мощность, или просто – **емкостная мощность** определяется по формулам:

$$Q_C = U_C I = \frac{U_C^2}{X_C} = I^2 X_C.$$

Однофазный переменный ток



Расчет мощностей в цепи с R,L,C-элементами

Если индуктивный и емкостной элементы находятся в одной цепи, то они могут обмениваться электроэнергией не только с источником, но и друг с другом. В этом случае имеет место процесс колебания энергии, но необратимых преобразований энергии нет (если пренебречь сравнительно небольшими потерями энергии в проводниках катушки индуктивности и в диэлектрическом материале между обкладками конденсатора). ***Мощность энергии, колеблющейся между источником и электроприемниками и не преобразующейся в другие виды энергии, и есть реактивная мощность Q.***

Полной мощностью S цепи синусоидального тока с R,L,C-элементами ***называют максимально возможную мощность***, получаемую при заданном входном напряжении **U** и общем токе **I** цепи. Максимальная мощность получается при $\cos\phi = 1$, то есть когда угол сдвига фаз между напряжением и током равен нулю ($\cos 0^\circ = 1$):

$$S = UI.$$

Однофазный переменный ток



Расчет коэффициента мощности в цепи с R,L,C-элементами

Из закона Ома, можно получить еще две равноценные формулы для подсчета полной мощности:

$$S = I^2 Z = \frac{U^2}{Z}.$$

Из треугольника мощностей формула расчета полной мощности:

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Единица измерения полной мощности **S** – *вольт-ампер (ВА)*. В практике используют более крупные единицы полной мощности: *киловольт-ампер (кВА)*, (1 кВА=10³ ВА) и *мегавольт-ампер (МВА)*, (1 МВА = 10⁶ ВА.)

Коэффициентом мощности цепи синусоидального тока с R,L,C-элементами *называется отношение активной мощности P к полной мощности S*, которое является безразмерной величиной и принимает значения в интервале от 0 до 1:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}.$$

Из треугольника векторов напряжений (рис.2) и треугольника сопротивлений (рис.3) можно получить другие формулы для коэффициента мощности:

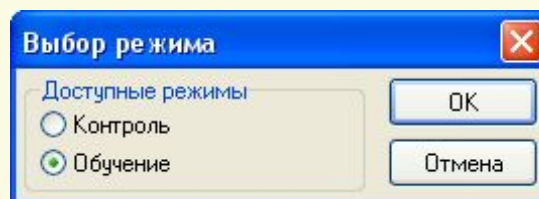
$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{Z}.$$

Однофазный переменный ток



ТЕСТ – Цепь с последовательными R,L,C-элементами

При нажатии на расположенную внизу кнопку-гиперссылку «ТЕСТ» запускается тестирующая программа и предоставляет пользователю выборку пяти вопросов и задач из общего количества 29 по теме раздела. При этом появляется окно *Выбор режима*.



В этом окне следует отметить пункт *Обучение* и после – нажать кнопку *Ок*, так как тестирование в настоящем пособии проводится только в режиме *Обучение*. При ошибочных ответах пользователя на вопросы теста приводятся подсказки в виде правильных ответов (в режиме контроля подсказки отсутствуют).

ТЕСТ

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

Резонансом в электротехнике называют такой режим работы цепи синусоидального тока, содержащей *индуктивный и емкостной элементы*, при котором *разность фаз ϕ (угол сдвига фаз) между напряжением и током равна нулю*.

Электрическому резонансу сопутствует ряд особенностей, которые обусловили его широкое использование в радиотехнике, электротехнике, измерительной технике и других областях.

Различают несколько видов резонанса: *резонанс напряжений* (при последовательном соединении **L, C**-элементов), *резонанс токов* (при параллельном соединении **L, C**-элементов), *резонанс в магнитосвязанных цепях* (колебательных контурах), резонанс в цепях с нелинейной индуктивностью – *ферромагнитный резонанс* и др. [1].

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

Резонансом напряжений называется режим электрической цепи синусоидального тока с последовательно соединенными индуктивностью L и конденсатором C при котором угол сдвига фаз между общим напряжением и током в цепи равен нулю (см. рис. 5,а).

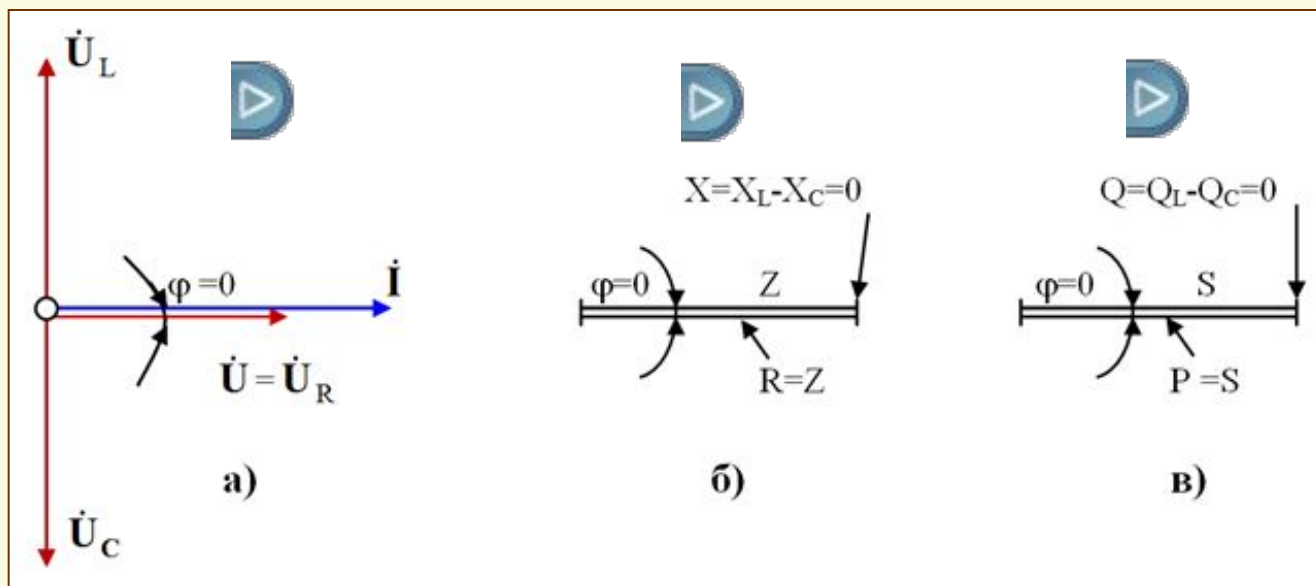


Рис.5. Резонанс напряжений в цепи с последовательным соединением R, L, C -элементов

а – векторная диаграмма;

б – вырожденный треугольник сопротивлений ($X = 0$);

в – вырожденный треугольник мощностей ($Q = 0$)

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

Условием наступления резонанса напряжений является равенство индуктивного и емкостного сопротивлений цепи: $X_L = X_C$.

Электрическая цепь, питаемая синусоидальным переменным током, в которую входит конденсатор и катушка индуктивности называется *колебательным контуром*.

Резонанс напряжений можно получить тремя способами:

1. Изменением *частоты ω* синусоидального тока;
2. Изменением *величин индуктивности* или *емкости* колебательного контура, при котором меняются индуктивное X_L или емкостное X_C сопротивление;
3. При одновременном изменении параметров цепи (колебательного контура) – *частоты ω , индуктивности L , емкости конденсатора C* .

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

Из условия резонанса напряжения $X_L = X_C$ следует, что так как $X_L = \omega L$ и $X_C = 1/\omega C$, то

$$\omega_{\text{рез}} L = \frac{1}{\omega_{\text{рез}} C}.$$

Отсюда следует, что резонансная частота $\omega_{\text{рез}}$, рад/сек определяется следующим соотношением индуктивности L и емкости C колебательного контура:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

Резонанс напряжений характеризуется рядом существенных особенностей:

1. Так как при резонансе напряжений угол сдвига фаз между напряжением и током равен нулю ($\phi = \psi_u - \psi_i = 0$), то *коэффициент мощности при резонансе принимает наибольшее значение, равное единице:*
 $\cos\phi = \cos 0^\circ = 1.$

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

Как видно из векторной диаграммы на **рис. 5,а**, в этом случае вектор тока \mathbf{I} и вектор общего напряжения \mathbf{U} совпадают по направлению, так как они имеют равные начальные фазы $\psi_u = \psi_i$.

2. При резонансе напряжений *векторы напряжения на индуктивном и емкостном элементах оказываются равными по величине и противоположными по фазе:*

$$U_{L\text{рез}} = U_{C\text{рез}},$$

так как

$$X_L \mathbf{I} = X_C \mathbf{I}.$$

В комплексной форме $\dot{U}_L = -\dot{U}_C$, то есть векторы этих напряжений разнонаправлены (**см. рис.5,а**).

3. Поскольку $U_{L\text{рез}} = U_{C\text{рез}}$, то напряжение на активном сопротивлении при резонансе напряжений оказывается равным напряжению сети (**см. рис. 5,а**):

$$U = \sqrt{U_{\text{рез}}^2 - (U_{C\text{рез}} - U_{L\text{рез}})^2} = U.$$

В комплексной форме $\dot{U}_R = \dot{U}$, то есть векторы этих напряжений однонаправлены (**см. рис. 5,а**).

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

4. Отношение индуктивного или емкостного сопротивлений к активному сопротивлению цепи с **R, L, C**-элементами при резонансе называется *добротностью колебательного контура Q*:

$$Q = \frac{X_{\text{рез}}}{R} = \frac{X_{\text{Срез}}}{R}.$$



Умножив числитель и знаменатель этих дробей на ток **I**, получим выражения для добротности колебательного контура через отношения напряжений:

$$Q = \frac{U_{\text{рез}}}{U} = \frac{U_{\text{Срез}}}{U}.$$

При больших значениях X_L и X_C и малых значениях активного сопротивления **R** ($R \ll X_L = X_C$), т.е. при высоких значениях добротности **Q** колебательного контура напряжения : $U_{L_{\text{рез}}}/U = X_{L_{\text{рез}}}/R = Q \gg 1$;
 $U_{C_{\text{рез}}}/U = X_{C_{\text{рез}}}/R = Q \gg 1$, то есть *напряжение на индуктивности и конденсаторе последовательного колебательного контура при его высокой добротности в режиме резонанса напряжений могут во много раз превысить напряжение питания*:

$$U_{L_{\text{рез}}} = U_{C_{\text{рез}}} \gg U.$$

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

Например, если у колебательного контура последовательной цепи с R, L, C-элементами, питаемым синусоидальным напряжением $U = 220 \text{ В}$, $R = 1 \text{ Ом}$, $X_{L\text{рез}} = X_{C\text{рез}} = 1000 \text{ Ом}$, то напряжение на индуктивности и конденсаторе, равно:

$$U_{L\text{рез}} = U_{C\text{рез}} = U \cdot Q = 220 \cdot 1000 = 220000 \text{ В} = 220 \text{ кВ.}$$

Поэтому при работе электротехнического оборудования, питаемого сетевым напряжением 220/380 вольт *резонанс напряжений никогда не используется.*

Однако в разнообразных устройствах радиотехники и электроники, где напряжение питания колебательного контура составляет микровольты ($1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}$), резонанс напряжений широко используется, позволяя многократно усилить входной сигнал в виде синусоидального напряжения.

5. Так как при резонансе напряжений $X_L = X_C$, то *полное сопротивление цепи принимает минимальное значение, равное активному сопротивлению:*

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_{\text{рез}} - X_C)^2} = Z = R.$$

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

При этом *общее реактивное сопротивление цепи становится равным нулю*: $X_{\text{рез}} = |X_L - X_C| = 0$.

Поэтому *треугольник сопротивлений при резонансе напряжений имеет вырожденный характер*, (см. рис. 5б.).

6. На основании закона Ома и с учетом того, что $Z_{\text{рез}} = R$ следует, что *ток I в цепи при резонансе напряжений достигает наибольшего значения*:

$$I_{\text{рез}} = U/Z_{\text{рез}} = U/R.$$

Отсюда следует, что *ток в цепи при резонансе напряжений может оказаться значительно больше тока, который мог бы быть при отсутствии резонанса*.

Это свойство позволяет экспериментально обнаружить резонанс напряжений, следя за изменением тока при изменении частоты ω , изменении индуктивности L или емкости C . Однако *резонансный ток при определенных условиях опасен* – он может, достигнув чрезмерно большой величины, привести к перегреву элементов цепи и выходу их из строя.

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

7. *Активная мощность P при резонансе напряжений имеет наибольшее значение*, так как $P = (I_{\text{рез}})^2 R$, а ток $I_{\text{рез}}$ – максимален.

8. *Общая реактивная мощность Q при резонансе напряжений равна нулю*: $Q = |Q_L - Q_C| = |U_L I - U_C I| = 0$, так как $U_L = U_C$. Поэтому *треугольник мощностей при резонансе имеет вырожденный характер*, как показано на **рис. 5в**.

9. При условии $R \ll X_L = X_C$ (т.е. при высокой добротности колебательного контура) *индуктивная и емкостная мощности $Q_L = Q_C \gg S = P$* . То есть эти мощности *могут во много раз превысить потребляемую полную мощность S* . При этом *полная мощность S при резонансе целиком выделяется на резистивном элементе R , в виде активной мощности P* .

Физически это объясняется тем, что *при резонансе напряжений происходит периодический обмен энергии магнитного поля в индуктивном элементе и энергии электрического поля в конденсаторе*.

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

На рис. 6 приведены зависимости $(U_L, U_C, I, Z, \cos\phi) = f(C)$, построенные в общем виде при $U = \text{const}$ и $\omega = 2\pi f = \text{const}$.

Кривые, выражающие зависимость полного тока I и сопротивления цепи Z , напряжения на индуктивности U_L и конденсаторе U_C и коэффициента мощности $\cos\phi$ от емкости батареи конденсатора C , называются *резонансными кривыми*.

Анализ этих зависимостей показывает, что при увеличении емкости батареи конденсаторов полное сопротивление Z сначала уменьшается, достигает минимума в режиме резонанса и становится равным активному сопротивлению R , а затем снова возрастает с увеличением емкости.

Соответственно изменению Z меняется полный ток цепи (по закону Ома I обратно пропорционален Z): с ростом емкости конденсаторов ток I вначале увеличивается, достигает максимума в режиме резонанса, а затем вновь уменьшается.

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

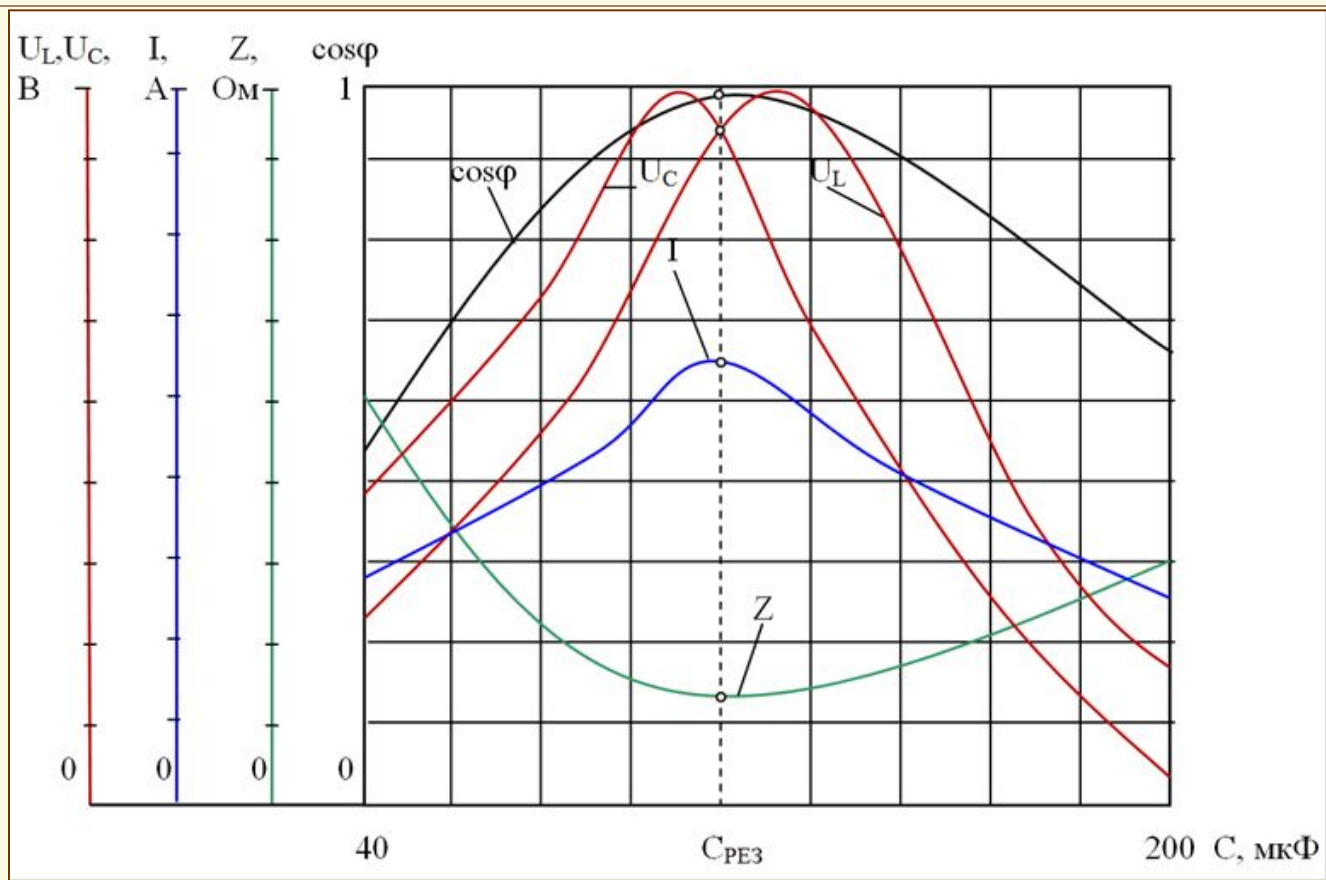


Рис. 6. Резонансные кривые U_L , U_C , I , Z , $\cos\phi$ в зависимости от емкости C при последовательном соединении катушки индуктивности и батареи конденсаторов²⁹

Однофазный переменный ток



Резонанс напряжений в последовательной цепи

Коэффициент мощности $\cos\phi$ изменяется с изменением емкости C в том же порядке: сначала с увеличением емкости C коэффициент мощности возрастает, достигая максимума равного единице в режиме резонанса, а затем уменьшается, в пределе стремясь к нулю.

Напряжения на индуктивности и конденсаторах имеют максимумы вблизи режима резонанса и становятся равными друг другу в этом режиме (см. рис. 6). Следует отметить, что достигаемые величины напряжений на конденсаторах и катушке индуктивности в режиме резонанса напряжений и вблизи него могут во много раз превышать входное напряжение приложенное ко всей цепи (см. п. 4).

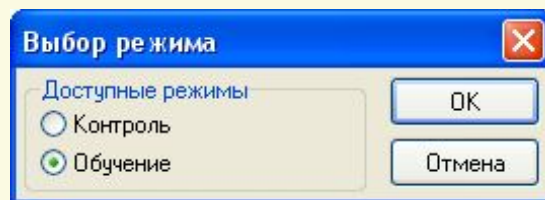
Таким образом, резонансные кривые позволяют установить минимальное полное сопротивление и наибольший ток в цепи при максимуме коэффициента мощности, равном единице, когда в цепи с последовательным соединением катушки индуктивности и батареи конденсаторов возникает резонанс напряжений.

Однофазный переменный ток



ТЕСТ – Резонанс напряжений в последовательной цепи

При нажатии на расположенную внизу кнопку-гиперссылку «ТЕСТ» запускается тестирующая программа и предоставляет пользователю выборку пяти вопросов и задач из общего количества 23 по теме раздела. При этом появляется окно *Выбор режима*.



В этом окне следует отметить пункт *Обучение* и после – нажать кнопку *Ок*, так как тестирование в настоящем пособии проводится только в режиме *Обучение*. При ошибочных ответах пользователя на вопросы теста приводятся подсказки в виде правильных ответов (в режиме контроля подсказки отсутствуют).



Однофазный переменный ток



Литература и электронные средства обучения

Основная литература

1. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 10-е изд. стер. – М.: Изд. Центр «Академия», 2007. – 544с.
2. К.Я. Вильданов, С.Т Гейдаров, И.Г. Забора и др. Электротехника и электроника. Элементы теории и задания к контрольным работам: Учебно-методическое пособие для студентов строительных специальностей. – М.: МГАКХиС, 2011. – 89 с.

Электронные средства обучения

1. А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Электротехника. Электронная версия учебника по электротехнике и электронике, 2009. (формат – веб-страницы).
2. И.Г. Забора. Часть 1. Электрические цепи и измерения. Электронное учебное пособие по лабораторным работам, 2014. (формат – веб-страницы).



ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА

Благодарю за внимание!