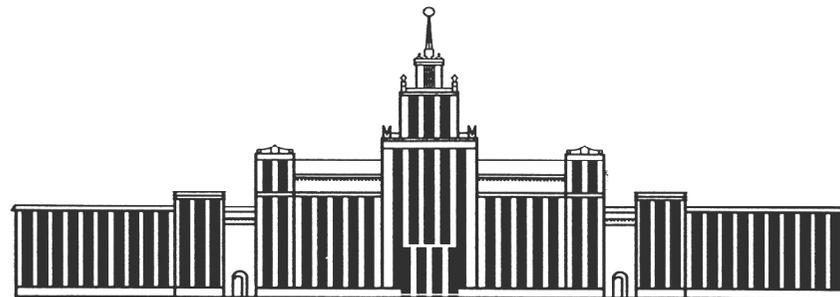

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

621.3.(07)
Э455

Г.П. Дубовицкий, В.В. Крымский,
Е.В. Литвинова, В.А. Яковлев

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**Учебное пособие для студентов
заочного факультета**

Часть вторая

**Челябинск
2017**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Теоретические основы электротехники»

621.3(07)
Э455

Г.П. Дубовицкий, В.В. Крымский,
Е.В. Литвинова, В.А. Яковлев

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Учебное пособие для студентов
заочного факультета

Часть вторая
Под редакцией В.А. Яковлева

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2017

УДК 621.3(076.5)
Э455

Одобрено
учебно-методической комиссией
энергетического факультета

Рецензенты:
О.С. Пташкина-Гирина, В.Л. Федяев

Э455 **Электротехника:** учебное пособие для студентов заочного факультета / Г.П. Дубовицкий, В.В. Крымский, Е.В. Литвинова, В.А. Яковлев; под ред. В.А. Яковлева. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – Ч. 2. – 91 с.

Учебное пособие предназначено для студентов неэлектрических специальностей заочного факультета, программой подготовки которых предусмотрено изучение дисциплины «Электротехника», «Общая электротехника», «Электротехника и электроника».

Пособие включает теоретический материал, контрольные задания, практические рекомендации по расчетам при изучении разделов «Электрические цепи переменного тока» и предназначено для организации самостоятельной работы студентов-заочников.

УДК 621.313(076.5)

ВВЕДЕНИЕ

Вся современная промышленность базируется на использовании различных электротехнических и электронных устройств. При разработке и эффективном использовании этих устройств необходимы знания законов постоянного и переменного тока, законов магнитного поля, принципов их работы в стационарном режиме и в условиях переходных процессов.

Дисциплина «Электротехника» является общетехнической дисциплиной и обеспечивает подготовку студентов технических специальностей с целью усвоения ими основных методов расчета цепей постоянного и переменного тока при работе с линейными и нелинейными потребителями на однофазную или трехфазную нагрузку, методов расчета магнитных цепей при работе в цепях постоянного и переменного токов.

При изучении дисциплины студенты выполняют контрольные работы. Данное пособие включает теоретический материал, контрольные задания и примеры расчета задач по теме «Однофазные электрические цепи переменного тока». При выполнении контрольных заданий студенты получают навыки использования теоретической базы электротехники для расчета конкретных электрических цепей, расчета результатов и погрешностей измерений тока, напряжения и мощности, выбора измерительных приборов в цепях переменного тока.

В процессе выполнения контрольных заданий студенты получают навыки преобразования электрических схем при соединении потребителей последовательно, параллельно или по смешанной схеме с целью их упрощения и применения для расчета известных методов. Рассматривают схемы подключения основных электроизмерительных приборов: амперметра, вольтметра и ваттметра для измерения электрических величин при разных режимах работы электрической цепи.

Данное учебное пособие предназначено для самостоятельной работы студентов неэлектрических специальностей заочного факультета, программой подготовки которых предусмотрено изучение одно- или двухсеместрового курса «Электротехника» или «Электротехника и электроника».

Глава 1. ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Большинство потребителей электрической энергии работает на переменном токе. В настоящее время почти вся электрическая энергия вырабатывается в виде энергии переменного тока. Это объясняется преимуществами производства и распределения этой энергии. Переменный ток получают на электростанциях, преобразуя с помощью генераторов механическую энергию в электрическую. Основное преимущество переменного тока по сравнению с постоянным заключается в возможности с помощью трансформаторов повышать или понижать напряжение, с минимальными потерями передавать электрическую энергию на большие расстояния, в трехфазных источниках питания получать сразу два напряжения: линейное и фазное. Кроме того, генераторы и двигатели переменного тока более просты по устройству, надежнее в работе и проще в эксплуатации по сравнению с машинами постоянного тока.

В электрических цепях переменного тока наиболее часто используют синусоидальную форму, характеризующуюся тем, что все токи и напряжения являются синусоидальными функциями времени. В генераторах переменного тока получают ЭДС, изменяющуюся во времени по закону синуса, и тем самым обеспечивают наиболее выгодный эксплуатационный режим работы электрических установок. Кроме того, синусоидальная форма тока и напряжения позволяет производить точный расчет электрических цепей с использованием метода комплексных чисел и приближенный расчет на основе метода векторных диаграмм. При этом для расчета используются законы Ома и Кирхгофа, но записанные в векторной или комплексной форме.

1.1. Параметры синусоидального тока и напряжения

Электрическая энергия производится и передается потребителю в виде трехфазного синусоидального напряжения. Однофазные потребители подключаются к одной из фаз А, В или С и нейтральному (нулевому) проводу трехфазного источника питания.

Мгновенные значения синусоидального тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ в любой момент времени выражаются формулами:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

где I_m, U_m – амплитудные значения тока и напряжения;

ψ_i, ψ_u – начальные фазы тока и напряжения;

$\omega=2\pi f$ [рад/с] – угловая частота;

$f=50$ Гц – стандартная частота напряжения в России;

$T = \frac{1}{f}$ – период напряжения и тока.

При расчетах разность начальных фаз $\psi_u - \psi_i = \varphi$ определяется как угол φ фазового сдвига между током и напряжением. Если $\psi_u > \psi_i$, то $u(t)$ и $i(t)$ запишутся в виде:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + 0^\circ), \quad i(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi);$$

тогда ток отстает по времени на $\psi_i = \varphi$. Графики напряжения и тока приведены на рис. 1.1.

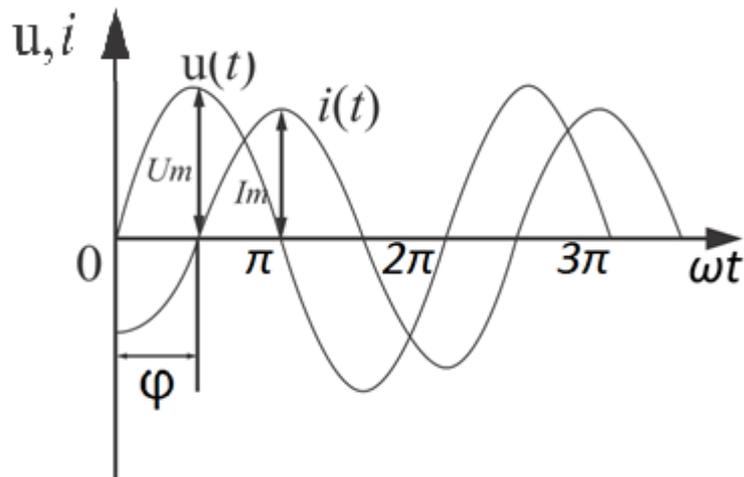


Рис.1.1. Графики напряжения и тока

При расчетах электрических цепей переменного тока переходят от мгновенных значений напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ к их действующим значениям: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$. Условились, что все измерительные приборы показывают действующие значения. Например, 220 В – действующее значение, тогда $u(t)=311 \sin \omega t$.

1.2. Комплексный метод расчета электрической цепи синусоидального тока

Точный расчет электрических цепей синусоидального тока производится методом комплексных чисел. При этом запись токов и напряжений может производиться в комплексной форме двумя выражениями: $i(t) \rightarrow \dot{I}$ или \underline{I} ; $u(t) \rightarrow \dot{U}$ или \underline{U} ; а также в векторной форме: $i(t) \rightarrow \bar{I}$, $u(t) \rightarrow \bar{U}$.

Синусоидальный ток $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi)$ можно представить комплексным числом \dot{I}_m на комплексной плоскости (рис.1.2)

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi},$$

где амплитуда тока I_m – модуль, а угол ψ , являющийся начальной фазой, – аргумент комплексного тока.

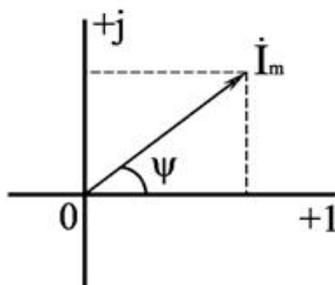


Рис.1.2 Комплексная плоскость

Для электрической цепи мгновенные значения напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ заменяются комплексами напряжения \underline{U} и тока \underline{I} и изображаются в масштабе в виде векторов на комплексной плоскости (рис. 1.3):

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + 0^\circ) \rightarrow \underline{U} = U e^{+j0^\circ},$$

$$i(t) = I \sin(\omega t - \varphi) \rightarrow \underline{I} = I e^{-j\varphi},$$

где $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$; $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ - действующие значения напряжения и тока;

e^{+j0° ; $e^{-j\varphi}$ – поворотные множители, показывающие угол поворота (фазу) напряжения и тока относительно действительной оси +1.

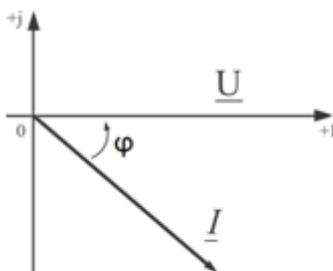


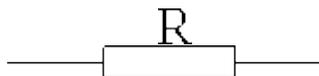
Рис. 1.3. Векторная диаграмма напряжения и тока

1.3. Элементы электрической цепи синусоидального тока

При расчете реальные электрические цепи заменяются схемами замещения, в которых потребители электрической энергии заменяются резистором, индуктивностью, конденсатором или их сочетаниями, с соответствующими сопротивлениями R , X_L и X_C .

В цепях переменного тока выделяют следующие виды сопротивлений.

Активное. Активным называют сопротивление резистора. Условное обозначение резистора



Единицей измерения сопротивления является Ом. Сопротивление резистора не зависит от частоты.

Реактивное. В разделе реактивные выделяют три вида сопротивлений: индуктивное X_L , и емкостное X_C и собственно реактивное X .

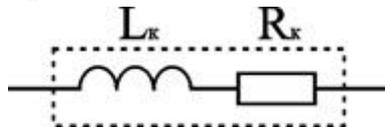
Конструктивно индуктивность выполняется в виде катушки с проводом.

Условное обозначение индуктивности



Катушка с проводом кроме свойства создавать магнитное поле обладает активным сопротивлением R .

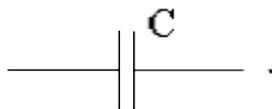
Условное обозначение реальной индуктивности



Единицей измерения индуктивности является **Генри (Гн)**. Часто используют дробные единицы

$$1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн}; 1 \text{ млГн} = 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Условным обозначением емкости является символ



Конструктивно емкость выполняется в виде двух проводников разделенных слоем диэлектрика. Форма проводников может быть плоской, трубчатой, шарообразной и др.

Единицей измерения емкости является фарада:

$$1\Phi = 1\text{Кл} / 1\text{В} = 1\text{Кулон} / 1\text{Вольт}.$$

Оказалось, что фарада является большой единицей, например, емкость земного шара равна $\approx 0,7 \Phi$. Поэтому чаще всего используют дробные значения

$$1 \text{ п}\Phi = 10^{-12} \Phi, \text{ (п}\Phi \text{ – пикофарада);}$$

$$1 \text{ н}\Phi = 10^{-9} \Phi, \text{ (н}\Phi \text{ – нанофарада);}$$

$$1 \text{ мк}\Phi = 10^{-6} \Phi, \text{ (мк}\Phi \text{ – микрофарада).}$$

Величины индуктивного X_L и емкостного сопротивления X_C определяются выражениями:

$$X_L = \omega L [\text{Ом}], \quad X_C = \frac{1}{\omega C} [\text{Ом}],$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота.

Для расчета сопротивления каждого элемента R , X_L и X_C записываются в комплексном виде в алгебраической или показательной форме и изображаются в масштабе в виде отрезков на комплексной плоскости:

$\underline{R} = R e^{+j0^\circ} = R$ – активное сопротивление, направлено по оси действительных значений (оси +1);

$\underline{X}_L = X_L e^{+j90^\circ} = +jX_L$ – индуктивное сопротивление, пропорционально угловой частоте ω ($X_L = \omega L$), направлено по мнимой оси $+j$.

$\underline{X}_C = X_C e^{-j90^\circ} = -jX_C$ – емкостное сопротивление, обратно пропорциональное угловой частоте ω ($X_C = \frac{1}{\omega C}$), направлено по мнимой оси $-j$.

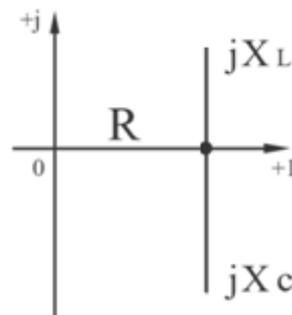


Рис. 1.4. Изображение сопротивлений на комплексной плоскости

1.4. Электрические цепи с элементами R, L и C

1.4.1. Электрическая цепь с активным сопротивлением R

Реальные потребители с активным сопротивлением R являются безинерционными элементами, поэтому напряжение $u(t)$ (рис.1.5), подведенное к активному сопротивлению R, совпадает по фазе с током $i(t)$, т.е. угол фазового сдвига между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ равен нулю ($\varphi_R = 0$).

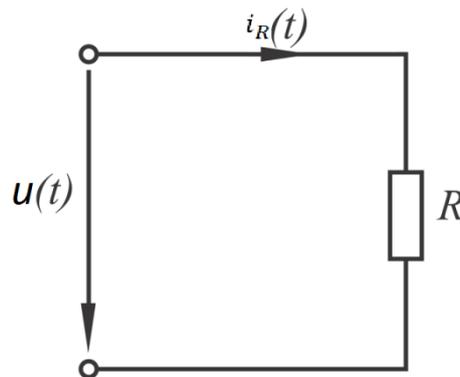


Рис. 1.5. Электрическая схема с активным сопротивлением R

Следовательно, напряжение и ток одновременно достигают максимального значения и одновременно переходят через ноль (рис. 1.6а).

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + 0^\circ); \quad i_R(t) = I_m \sin(\omega t + 0^\circ).$$

Действующее значение тока I_R , возникающего в схеме (рис. 1.5), можно рассчитать по закону Ома в комплексной форме

$$\underline{U} = U e^{+j0^\circ}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad \underline{I}_R = \frac{\underline{U}}{R} = \frac{U e^{+j0^\circ}}{R e^{+j0^\circ}} = I_R e^{+j0^\circ}.$$

Векторная диаграмма напряжения и тока приведена на рисунке 1.6б.

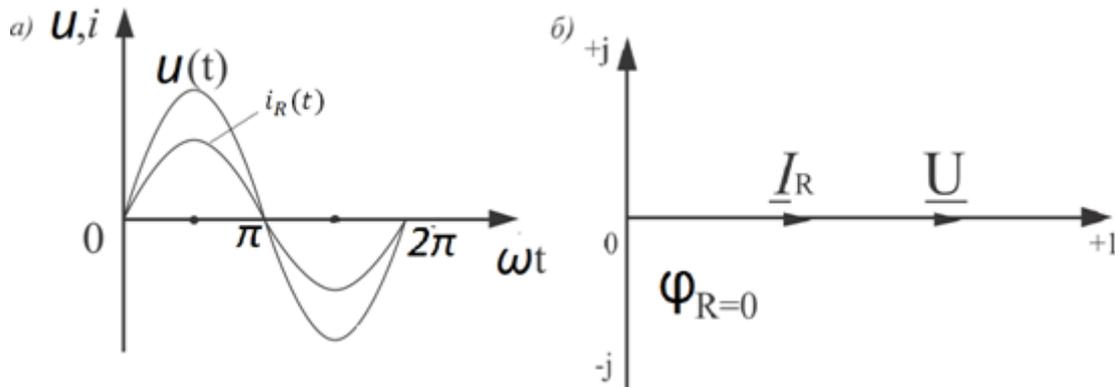


Рис. 1.6. Графики (а) напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$; векторная диаграмма (б) для электрической цепи с сопротивлением R

В электрической цепи с активным сопротивлением R расходуется электрическая мощность:

$$P = UI_R = I_R^2 R = \frac{U^2}{R} \text{ [Вт]}.$$

1.4.2. Электрическая цепь с идеальной индуктивностью L

В идеальной катушке индуктивности пренебрегают сопротивлением проводов обмотки ($R_K=0$) и учитывают только индуктивное сопротивление $X_L = 2\pi fL$. В такой цепи (рис. 1.7) при подключении ее к напряжению

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + 0^\circ)$$

происходит отставание тока по фазе на угол $\varphi_L = 90^\circ$ (рис. 1.8а)

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - 90^\circ).$$

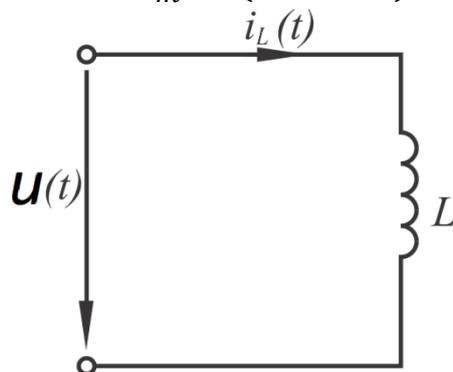


Рис. 1.7. Электрическая схема с идеальной индуктивностью L

Действующее значение тока I_L , возникающего в схеме, можно рассчитать по закону Ома в комплексной форме:

$$\underline{U} = Ue^{+j0^\circ}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}};$$

$$\underline{I}_L = \frac{\underline{U}}{\underline{X}_L} = \frac{Ue^{+j0^\circ}}{Xe^{+j90^\circ}} = I_L e^{-j90^\circ}.$$

Векторная диаграмма напряжения и тока приведена на рисунке 1.8 б.

В цепи с идеальной катушкой индуктивности активная мощность не расходуется ($P=0$). При работе в цепи происходит обмен энергией между сетью и катушкой индуктивности. В первую половину периода $i(t)>0$ электрическая энергия отдается в катушку и преобразуется в энергию магнитного поля. Во вторую половину периода магнитный поток создает ЭДС самоиндукции и энергия возвращается в сеть.

Для характеристики энергетических процессов в индуктивности используют реактивную мощность:

$$Q_L = U \cdot I_L = I_L^2 \cdot X_L [\text{вар}].$$

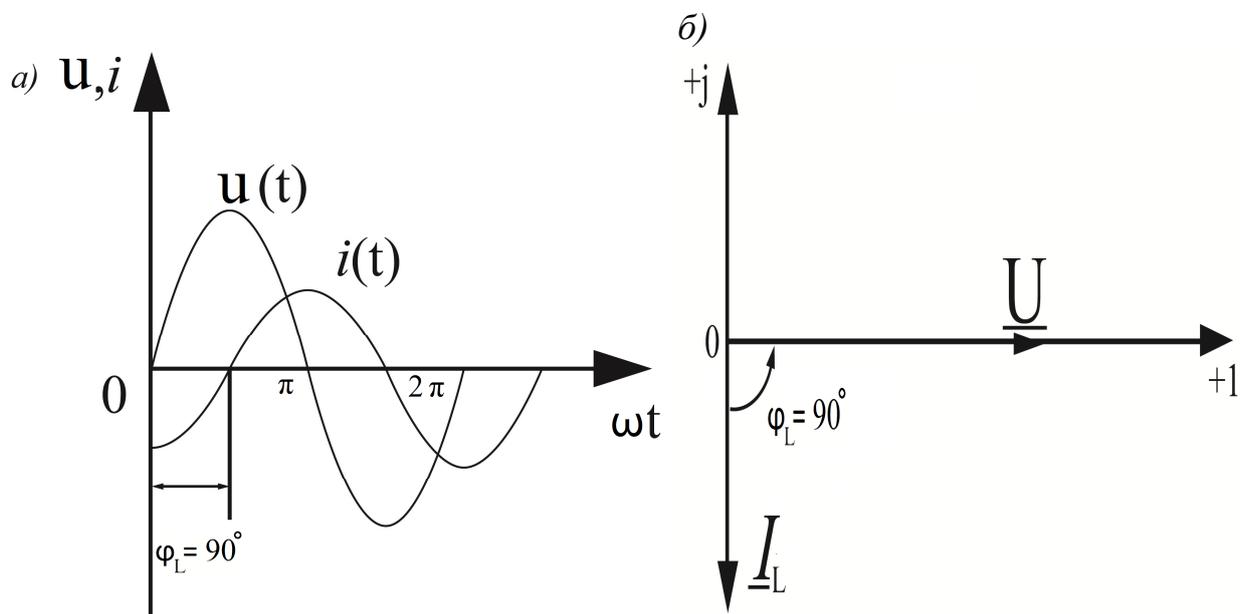


Рис. 1.8. Графики (а) и векторная диаграмма (б) напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ для цепи с индуктивностью L

1.4.3. Электрическая цепь с емкостью C

При подключении цепи с конденсатором C (рис. 1.9) к синусоидальному напряжению

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + 0^\circ)$$

в цепи возникнет синусоидальный ток (рисунок 1.10а)

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ).$$

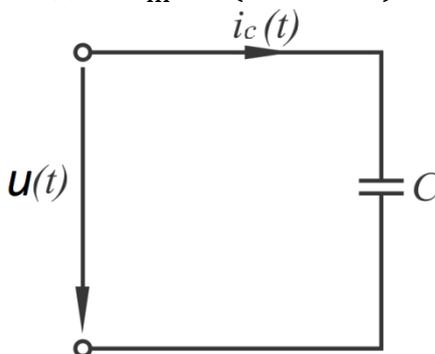


Рис.1.9. Электрическая цепь с емкостью C

Ток через конденсатор опережает напряжение питания на $\varphi_c = 90^\circ$. Это происходит потому, что емкостный ток достигает максимального значения при максимальном изменении напряжения, т.е. при прохождении напряжения через ноль.

Действующее значение тока I_c , возникающего в схеме, можно рассчитать по закону Ома в комплексной форме:

$$\underline{U} = Ue^{+j0^\circ}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}};$$

$$I_c = \frac{\underline{U}}{\underline{X}_c} = \frac{Ue^{+j0^\circ}}{X_c - j90^\circ} = I_c e^{+j90^\circ}.$$

Векторная диаграмма напряжения и тока приведена на рис. 1.10б.

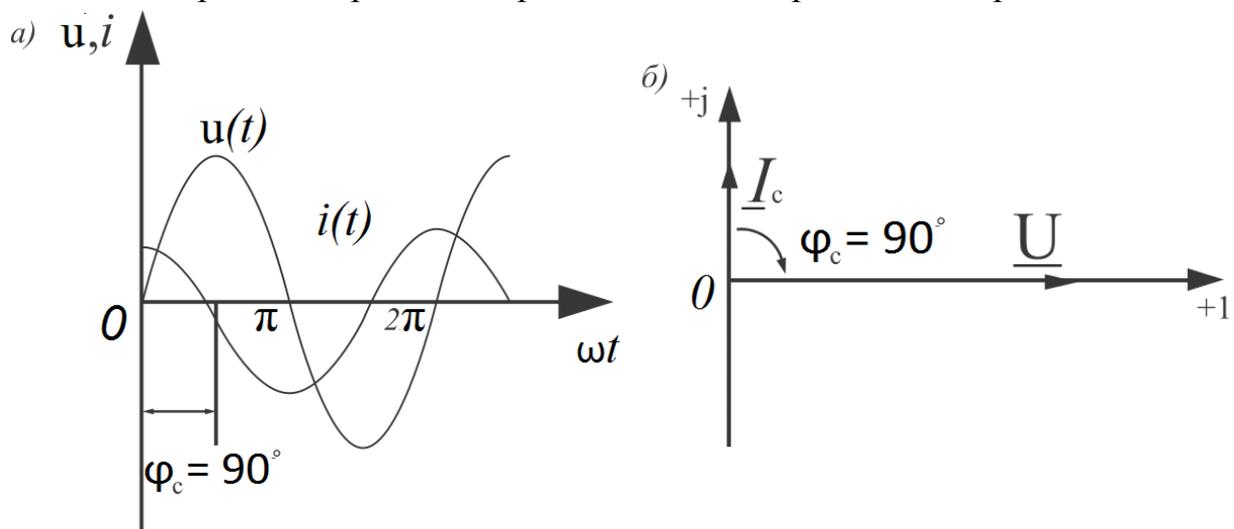


Рис. 1.10. Графики (а) и векторная диаграмма (б) напряжения и тока для электрической цепи с емкостью С

Энергетические процессы в емкости С определяются зарядом конденсатора при $i(t) > 0$ и его разрядом при $i(t) < 0$, т.е. отдачей полученной энергии обратно в сеть. Поэтому среднее значение активной мощности за период равно нулю ($P=0$). Такой обмен энергией характеризуют реактивной (емкостной) мощностью

$$Q_C = U \cdot I_c = I_c^2 \cdot X_C \text{ (вар)}.$$

Следует заметить, что реактивные мощности Q_L и Q_C имеют разные знаки: $+Q_L$ и $-Q_C$.

1.5. Электрические цепи с элементами $R_K L_K$ и RC

1.5.1. Электрическая цепь с реальной катушкой индуктивности $R_K L_K$
 В идеальной катушке индуктивности учитывается только сопротивление индуктивности L_K : $X_K = 2\pi f L_K$, а сопротивление проводов катушки R_K не учитывается, полагая, что $R_K \ll X_K$. В реальной катушке индуктивности (рис. 1.11) с большим количеством витков необходимо учитывать их активное сопротивление R_K и индуктивное сопротивление X_K .

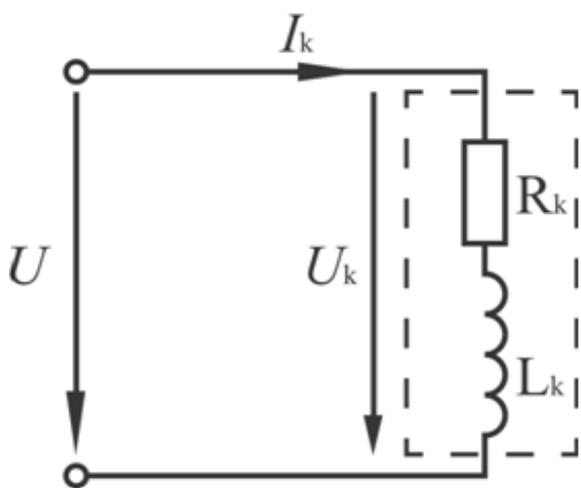


Рис. 1.11. Электрическая схема с катушкой индуктивности

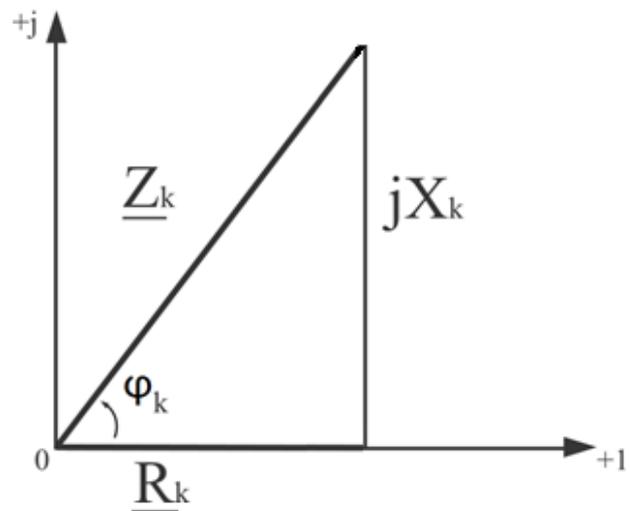


Рис.1.12. Треугольник сопротивлений катушки индуктивности

В комплексной форме полное сопротивление катушки Z_K запишется в виде

$$\underline{Z}_K = R_K + jX_K$$

и на комплексной плоскости изображается в масштабе в виде треугольника сопротивлений (рис. 1.12).

Полное сопротивление Z_K катушки индуктивности определяется из треугольника сопротивления (см. рис. 1.12)

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}.$$

Угол φ_K определяет угол фазового сдвига между напряжением U и током I (рис. 1.12)

$$\varphi_K = \operatorname{arctg} \frac{X_K}{R_K}.$$

В комплексной форме полное сопротивление катушки запишется в виде

$$\underline{Z}_K = Z_k e^{+j\varphi_K}.$$

Величину тока в катушке индуктивности (см. рис. 1.11) можно рассчитать по закону Ома

$$I_K = \frac{U}{Z_K}.$$

Если при расчетах начальную фазу тока I_K принять за ноль ($\psi_i = 0$), то в комплексной форме ток запишется в виде

$$\underline{I}_K = I_k e^{+j0^\circ}.$$

Падение напряжения на катушке индуктивности U_K , равное напряжению питания U (см.рис. 1.11), можно рассчитать по закону Ома в комплексной форме:

$$\underline{U} = \underline{U}_K = \underline{I}_K \cdot \underline{Z}_K = I_k e^{+j0^\circ} Z_k e^{+j\varphi_K} = U_k e^{+j\varphi_K},$$

т.е. напряжение питания $U=U_K$ опережает ток через катушку индуктивности на угол φ_K . Векторная диаграмма для схемы на рис. 1.11 приведена на рис. 1.13.

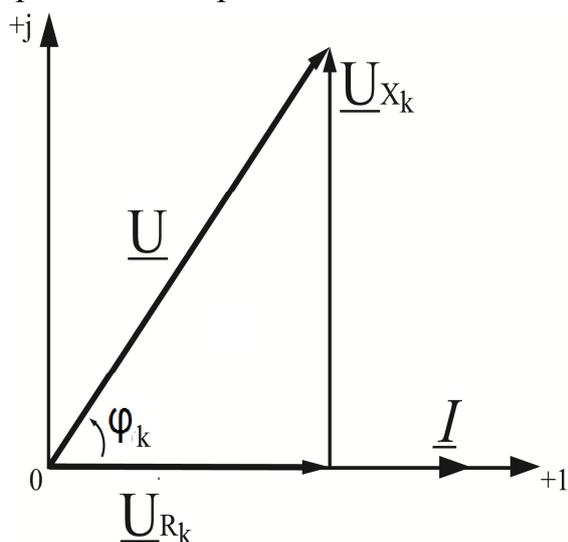


Рис. 1.13. Векторная диаграмма катушки индуктивности

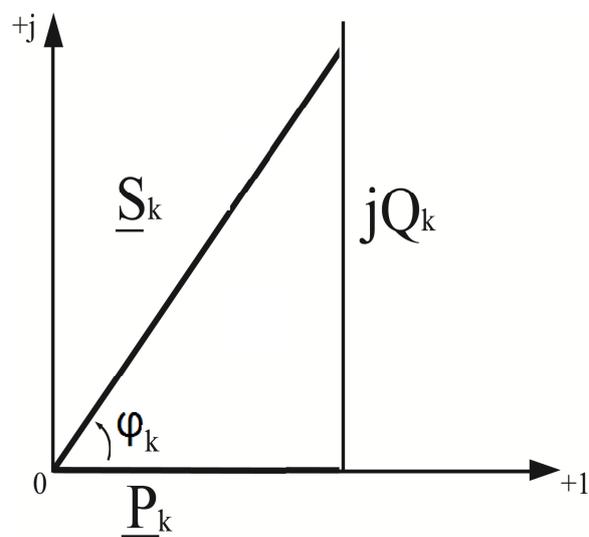


Рис. 1.14. Треугольник мощностей катушки индуктивности

Напряжение U_K (см. рис. 1.13) можно разложить на две составляющие:

$\underline{U}_{R_K} = I_K R_K e^{+j0^\circ}$ – падение напряжения на R_K ;

$\underline{U}_{X_K} = I_K e^{+j0^\circ} \underline{X}_K e^{+j90^\circ} = \underline{U}_{X_K} e^{+j90^\circ}$ – падение напряжения на X_K .

Для расчета энергетических соотношений в катушке индуктивности достаточно умножить стороны треугольника сопротивлений (см.рис. 1.12) на I_K^2 и получим треугольник мощностей (рис. 1.14), в котором:

$P_K = I_K^2 R_K$ [Вт] – активная мощность;

$Q_K = I_K^2 X_K$ [вар] – реактивная мощность;

$S_K = I_K^2 Z_K = UI_K$ [ВА] – полная мощность.

1.5.2. Электрическая цепь с элементами R и C

При последовательном соединении активного сопротивления R и конденсатора емкостью C (рис.1.15) полное сопротивление цепи запишется в виде:

$$\underline{Z} = R - jX_C,$$

где $X_C = \frac{1}{\omega C}$ [Ом] – реактивное (емкостное) сопротивление конденсатора.

Это сопротивление \underline{Z} можно изобразить в масштабе на комплексной плоскости в виде треугольника сопротивлений (рис.1.16).

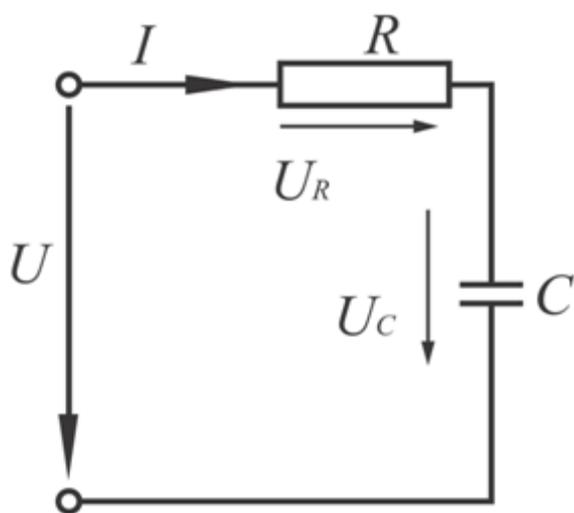


Рис. 1.15. Электрическая схема с R и C

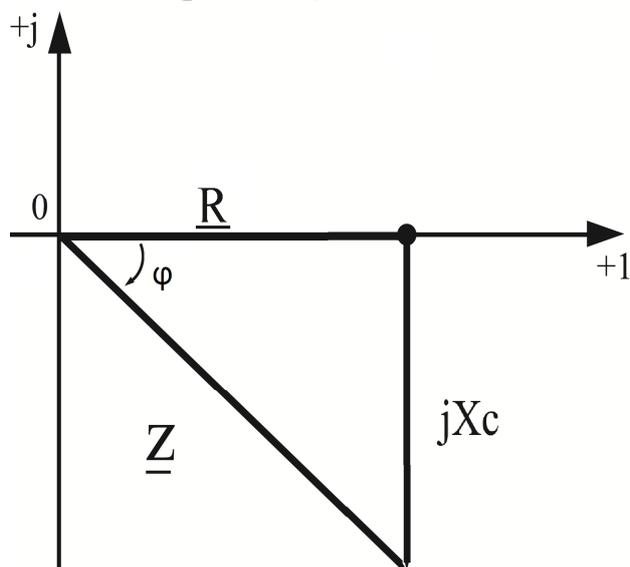


Рис. 1.16. Треугольник сопротивлений в схеме с R и C

Полное сопротивление цепи Z и угол φ можно определить из треугольника сопротивлений:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_C}{R}.$$

В комплексной форме полное сопротивление \underline{Z} запишется в виде:

$$\underline{Z} = Z e^{-j\varphi}.$$

Величину тока в цепи можно определить по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z}.$$

При расчете цепей с последовательным соединением элементов, когда по всем элементам (R и X_C) протекает один и тот же ток I , его начальную фазу принимают за ноль ($\psi_i = 0$), тогда комплекс тока в цепи запишется в виде:

$$\underline{I} = I e^{+j0}.$$

Для построения векторной диаграммы запишем второй закон Кирхгофа для рассматриваемой цепи (см. рис. 1.15):

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C,$$

$$\text{где } \underline{U}_R = R I e^{+j0} = RI; \quad \underline{U}_C = X_C e^{-j90^\circ} \cdot I e^{+j0} = X_C I e^{-j90^\circ}.$$

Векторная диаграмма приведена на рис. 1.16.

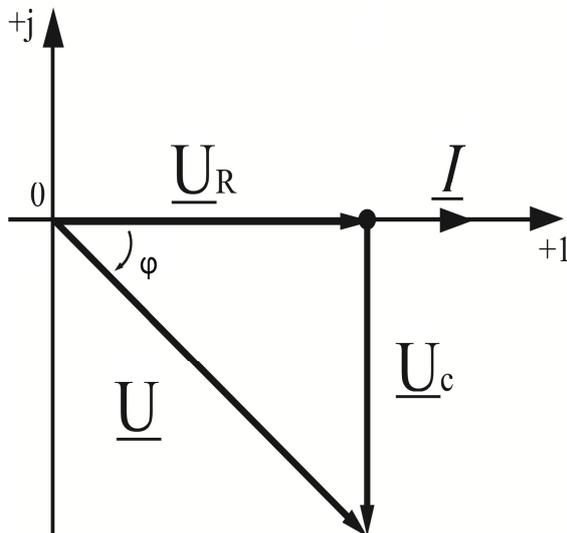


Рис. 1.16. Векторная диаграмма для схемы с R и C

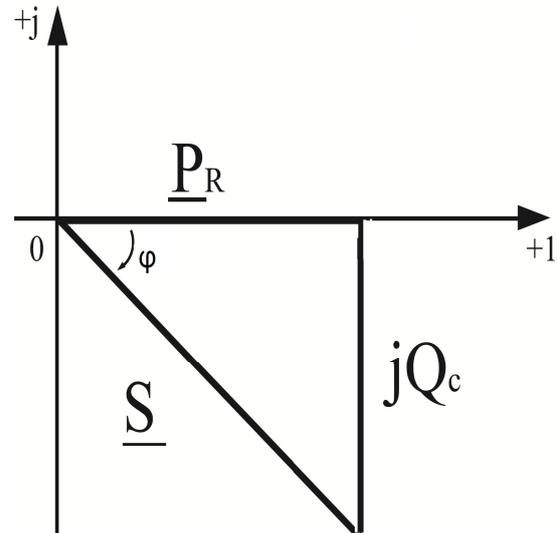


Рис. 1.17. Треугольник мощностей для схемы с R и C

Для расчета энергетических соотношений для данной цепи умножим стороны треугольника сопротивлений (см.рис. 1.15) на I^2 и получим треугольник мощностей (рис. 1.17), в котором:

$$P_R = RI^2 \text{ [Вт]} - \text{активная мощность};$$

$$Q_C = X_C I^2 \text{ [вар]} - \text{реактивная мощность};$$

$$S = ZI^2 = UI \text{ [ВА]} - \text{полная мощность}.$$

1.6. Электрическая цепь с последовательным соединением резистора R1, индуктивной катушки R_кL_к и конденсатора С

В неразветвлённой электрической цепи переменного тока, содержащей резистор R1 с активным сопротивлением, индуктивную катушку с полным сопротивлением Z_к (R_к, L_к) и конденсатор С с ёмкостным сопротивлением X_с (рис.1.18), напряжение питающей сети равно векторной сумме напряжений,

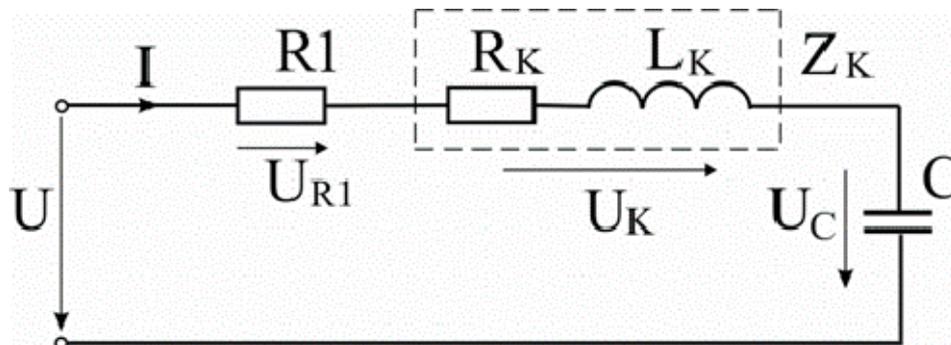


Рис. 1.18. Схема электрической цепи

действующих на участках цепи. В соответствии с этим выражение для напряжения, подводимого к электрической цепи (рис. 1.18), может быть записано уравнение по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений напряжений на этих элементах:

$$u(t) = u_{R_1}(t) + u_k(t) + u_c(t),$$

в векторной форме

$$\bar{U} = \bar{U}_{R_1} + \bar{U}_K + \bar{U}_C$$

или в комплексной форме

$$\underline{U} = \underline{U}_{R_1} + \underline{U}_K + \underline{U}_C,$$

где $\underline{U}_{R_1} = R_1 \underline{I}$, $\underline{U}_K = \underline{Z}_K \underline{I} = (R_K + jX_K) \underline{I}$, $\underline{U}_C = -jX_C \underline{I}$ –

комплексные напряжения на участках цепи, определяемые как произведение комплексного тока \underline{I} на соответствующие сопротивления;

R_1 – активное сопротивление резистора, $Z_K = (R_K + jX_K)$ – комплексное сопротивление индуктивной катушки, R_K – активное сопротивление индуктивной катушки, $X_K = \omega L_K$ – реактивное (индуктивное) сопротивление индуктивной катушки, $X_C = 1 / \omega C$ – реактивное (ёмкостное) сопротивление конденсатора C ,

$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$ – полное сопротивление индуктивной катушки,

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – частота напряжения питающей сети.

По уравнению для комплексного напряжения на входе цепи можно построить векторную диаграмму тока и напряжений электрической цепи, принимая во внимание, что умножение вектора напряжения на множитель $(+j)$ соответствует повороту его относительно вектора тока на угол $\pi/2$ в направлении отсчёта положительных углов (против часовой стрелки), а умножение на множитель $(-j)$ – повороту вектора напряжения на угол $\pi/2$ по часовой стрелке.

Вектор напряжения \underline{U}_{R_1} на активном сопротивлении при этом совпадает с вектором тока \underline{I} . Угол φ – угол между векторами тока и напряжения, подводимого к цепи (откладывается от вектора тока к вектору напряжения).

При построении векторных диаграмм последовательных цепей рекомендуется принять начальную фазу тока за нуль, тогда направление тока на диаграмме будет совпадать с вещественной осью $(+1)$.

Построенные таким образом векторные диаграммы для электрической цепи (рис. 1.18), представлены на рис. 1.19.

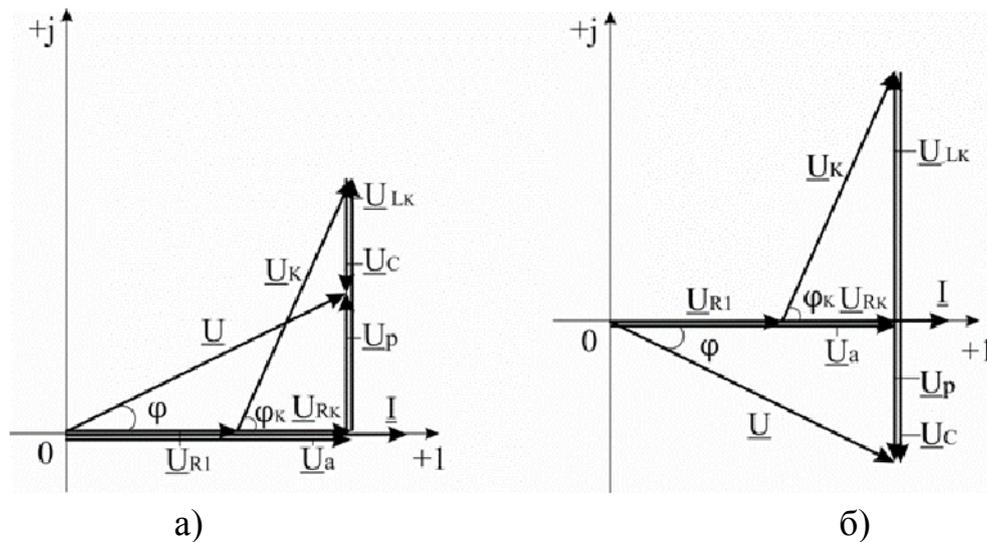


Рис. 1.19. Векторные диаграммы

На рис. 1.19.а в цепи преобладает индуктивность и ток отстаёт от напряжения на угол $\varphi > 0$, на рис. 1.19.б в цепи преобладает ёмкость и ток по фазе опережает напряжение на угол $\varphi < 0$.

Комплекс тока цепи $\underline{I} = \frac{U}{Z}$.

Комплексное сопротивление цепи (см. рис. 1.18)

$$\underline{Z} = R_1 + R_K + j(X_K - X_C) = R + jX = Ze^{j\varphi},$$

где $R = R_1 + R_K$ – активное сопротивление цепи,

$X = X_K - X_C$ – реактивное сопротивление цепи,

$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – полное сопротивление цепи,

$\varphi = \arctg \frac{X}{R}$ – аргумент комплексного сопротивления, равный углу сдвига по фазе между напряжением и током.

Соотношение между активным, реактивным и полным сопротивлениями принято наглядно иллюстрировать построением треугольников сопротивлений (рис. 1.20).

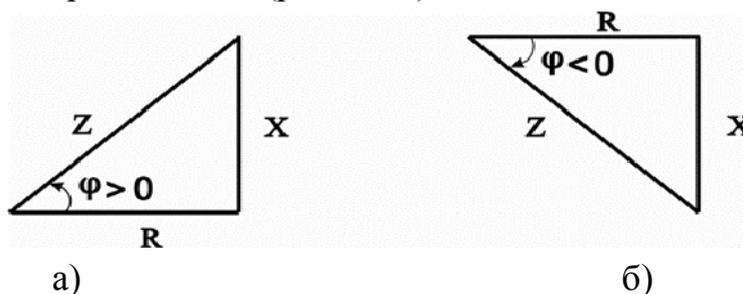


Рис. 1.20. Треугольники сопротивлений

На рис. 1.20 а – в цепи преобладает индуктивность, на рис. 1.20 б – в цепи преобладает ёмкость. Умножив стороны треугольников сопротивлений на квадрат тока в цепи I^2 , получим треугольники мощностей (рис. 1.21).

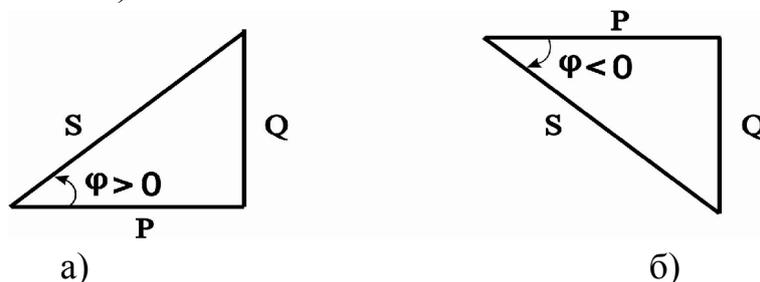


Рис. 1.21. Треугольники мощностей

На рис. 1.21.а – в цепи преобладает индуктивность, на рис. 1.21.б – в цепи преобладает ёмкость.

Треугольники мощностей подобны треугольникам сопротивлений. Из треугольника мощностей можно установить взаимосвязь между активной P , реактивной Q и полной S мощностями электрической цепи:

$$P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi, \quad Q = S \sin \varphi, \quad S = UI = \sqrt{R^2 + Q^2}.$$

Комплексная мощность всей цепи

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + jQ = P + j(Q_L - Q_C) = S(\cos \varphi + j \sin \varphi),$$

где $\underline{I}^* = I e^{-j\varphi}$ – сопряжённое значение комплексного тока $\underline{I} = I e^{+j\varphi}$.

В электрической цепи переменного тока (рис. 1.18) при последовательном включении катушки индуктивности и конденсатора может возникнуть резонанс напряжений, когда индуктивное сопротивление катушки равно ёмкостному сопротивлению конденсатора $X_K = X_C$. При этом реактивное сопротивление цепи становится равным нулю $X = X_K - X_C = 0$, входное сопротивление цепи минимально и является чисто активным ($Z=R$). Действующее значение тока при данном напряжении U достигает максимального значения и совпадает с ним по фазе ($\varphi=0$).

При резонансе напряжений напряжения на конденсаторе и индуктивности равны: $U_C = U_{LK} = X_C I = X_K I$ и в зависимости от тока и реактивных сопротивлений могут принять большие значения: $U_L > U$, $U_C > U$ и превышать напряжение питающей сети U .

Резонанс напряжений в промышленных электрических установках нежелательное и опасное явление, так как оно может привести к аварии вследствие недопустимого перегрева отдельных элементов электрической цепи или к пробое изоляции обмоток электрических машин и аппаратов, изоляции кабеля и конденсаторов при возможном перенапряжении на отдельных участках цепи.

В тоже время резонанс напряжений широко используется в радиотехнике и электронике в приборах и устройствах, основанных на резонансном явлении.

1.7. Электрические цепи с параллельным соединением элементов

1.7.1. Электрическая цепь с параллельным соединением двух ветвей

Проведем анализ работы электрической цепи с параллельным соединением элементов R, L, C . Рассмотрим следующую схему.

Положим, что заданы величины R_1 , R_2 , L , C , частота f и входное напряжение U . Требуется определить токи в ветвях и ток всей цепи.

В данной схеме рис.1.22 две ветви. Согласно свойству параллельного соединения, напряжение на всех ветвях параллельной цепи одинаковое, если пренебречь сопротивлением подводящих проводов.

Решение задачи разбивается на ряд этапов

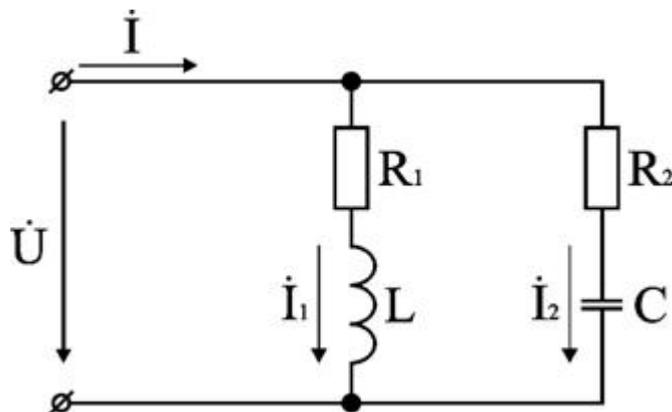


Рис. 1.22. Схема электрической цепи

1. Определение сопротивлений ветвей.

Реактивные сопротивления элементов L и C определяем по формулам

$$X_L = \omega L, X_C = 1 / \omega C, \omega = 2\pi f.$$

Полное сопротивление ветвей равны

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2}, \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_C^2},$$

соответствующие им углы сдвига фаз

$$\varphi_1 = \arctg(X_L / R_1), \varphi_2 = \arctg(X_C / R_2).$$

2. Нахождение токов в ветвях.

Токи в ветвях находятся по закону Ома

$$I_1 = U / Z_1, I_2 = U / Z_2.$$

3. Нахождение тока всей цепи.

Ток всей цепи может быть найден несколькими методами: графическим, методом мощностей, методом проекций и методом проводимостей.

Чаще всего используют метод проекций и метод проводимостей. Для метода проекций строится векторная диаграмма (рис. 1.23), на которой фаза напряжения U принимается $\varphi_u=0$. Тогда ток I_2 опережает напряжение U на угол φ_2 , а ток I_1 отстает на угол φ_1 .

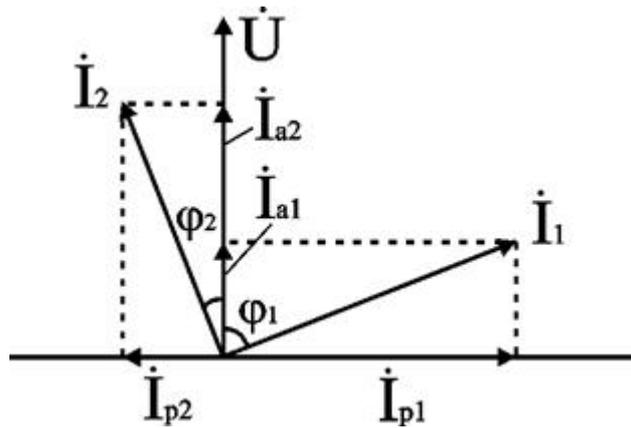


Рис. 1.23. Векторная диаграмма

В методе проекций ток I_1 и I_2 раскладываются по две ортогональные составляющие активную и реактивную. Ось активной составляющей совпадает с вектором напряжения U . Ось реактивной составляющей перпендикулярна вектору U (рис. 1.23).

Активные составляющие токов равны

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1, \quad I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2, \\ I_a = I_{1a} + I_{2a}.$$

Реактивные составляющие токов равны

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1, \quad I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2, \\ I_p = I_{1p} - I_{2p}.$$

В последнем уравнении взят знак минус, поскольку составляющие I_{1p} (индуктивная) и I_{2p} (емкостная) направлены в разные стороны от оси U . Полный ток находится из уравнений

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}, \\ \varphi = \arctg(I_p / I_a).$$

В методе проводимостей также используется разложение на активные и реактивные составляющие. Активные составляющие токов записываются в виде

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U_1}{Z_1} \times \frac{R_1}{Z_1} = U \frac{R_1}{Z_1^2} = U g_1,$$

где через $g_1 = R_1 / Z_1^2$ обозначена величина, названная активной проводимостью первой ветви. Аналогичным образом получим

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{U_2}{Z_2} \times \frac{R_2}{Z_2} = U \frac{R_2}{Z_2^2} = U g_2,$$

где $g_2 = R_2 / Z_2^2$; а величину $g = g_1 + g_2$ называют активной проводимостью всей цепи.

Аналогично запишем реактивные составляющие токов

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1 = \frac{U_1}{Z_1} \times \frac{X_L}{Z_1} = U \frac{X_L}{Z_1^2} = Ub_1,$$

$$I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2 = \frac{U_2}{Z_2} \times \frac{X_C}{Z_2} = U \frac{X_C}{Z_2^2} = Ub_2,$$

где b_1 и b_2 – реактивные проводимости ветвей $b_1 = X_L / Z_1^2$, $b_2 = X_C / Z_2^2$.
Для реактивной проводимости всей цепи имеем

$$b = b_1 - b_2.$$

4. Анализ расчетных данных.

В зависимости от соотношения реактивных проводимостей b_1 и b_2 возможны три варианта: $b_1 > b_2$; $b_1 < b_2$; $b_1 = b_2$.

Для варианта $b_1 > b_2$ имеем $I_{1p} > I_{2p}$, $\varphi > 0$. Цепь имеет активно-индуктивный характер. Векторная диаграмма изображена на рис. 1.24.

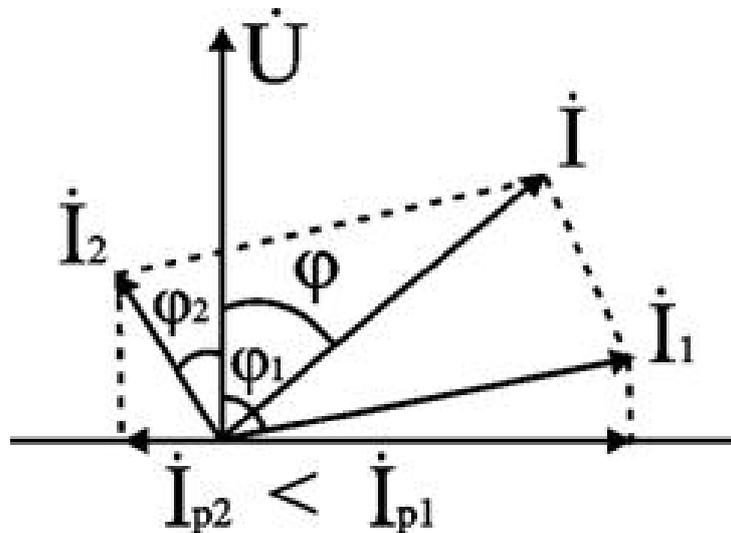


Рис. 1.24. Векторная диаграмма при активно-индуктивной нагрузке

При $b_1 < b_2$ токи $I_{1p} < I_{2p}$, $\varphi < 0$. Цепь имеет активно-емкостный характер. Векторная диаграмма изображена на рис. 1.25.

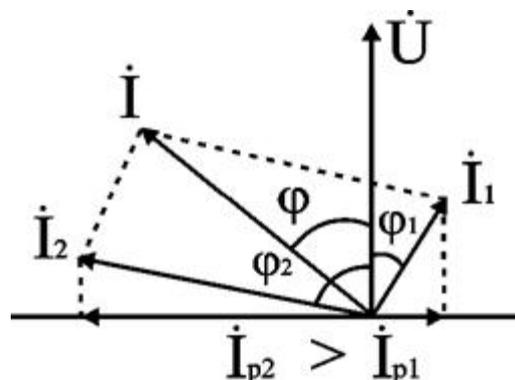


Рис. 1.25. Векторная диаграмма при активно-емкостной нагрузке

Если $b_1 = b_2$, то $I_{1p} = I_{2p}$, $\varphi = 0$. При равенстве индуктивной составляющей тока I_{1p} и емкостной составляющей тока I_{2p} вектор общего тока совпадает с вектором U приложенного выражения $\varphi = 0$. Цепь имеет чисто активное сопротивление, а ток $I = I_a = I_{1a} + I_{2a}$.

Ток потребляемый цепью от источника наименьший. Этот режим называется резонанс токов. Векторная диаграмма изображена на рис. 1.26.

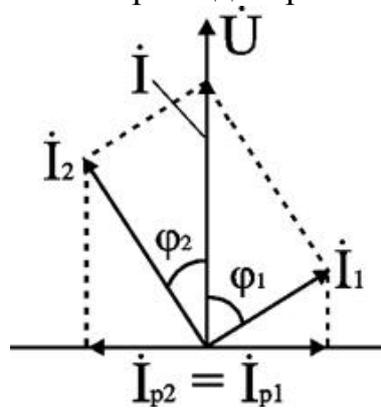


Рис. 1.26. Векторная диаграмма при резонансе токов

1.7.2 Электрическая цепь с параллельным соединением трех ветвей

При параллельном соединении трех ветвей элементов получают разветвленную цепь (рис. 1.27). При параллельном соединении элементов токи в отдельных ветвях зависят только от напряжения источника питания и полного сопротивления каждой ветви. При этом ток в ветви с резистором I_R совпадает по фазе с напряжением источника, ток в ветви с катушкой I_K отстаёт по фазе от напряжения источника питания на угол φ , зависящий от активного и реактивного сопротивления реальной катушки индуктивности. Ток в ветви с конденсатором I_C опережает напряжение источника питания на 90° (рис. 1.28).

В соответствии с первым законом Кирхгофа общий ток I , потребляемый такой цепью от источника питания, определяется геометрической суммой токов отдельных ветвей:

$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_K + \bar{I}_C$$

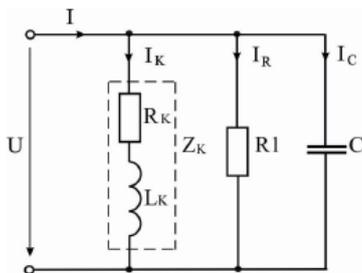


Рис. 1.27. Схема электрической цепи

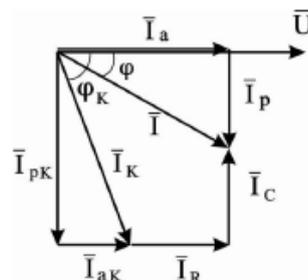


Рис. 1.28. Векторная диаграмма

Решение задачи производится в несколько этапов.

1. Расчет токов.

Расчет токов во всех ветвях проводится по закону Ома. При расчете цепей с параллельным соединением элементов, когда все элементы цепи (R_1 , Z_K и C) находятся под одним напряжением U , его начальную фазу принимают за ноль ($\psi_U=0$). Тогда комплекс напряжения в цепи запишется в виде $\underline{U} = Ue^{+j0^\circ}$.

Соотношения для расчета токов в ветвях запишутся в виде:

$$\text{– ток в резисторе } R_1 \quad \underline{I}_R = \frac{U}{R_1} = \frac{Ue^{+j0^\circ}}{R_1e^{+j0^\circ}} = I_R e^{+j0^\circ},$$

$$\text{– ток в катушке индуктивности} \quad \underline{I}_K = \frac{U}{Z_K} = \frac{Ue^{+j0^\circ}}{Z_Ke^{+j\varphi_K}} = I_Ke^{-j\varphi_K},$$

$$\text{– ток в конденсаторе} \quad \underline{I}_C = \frac{U}{X_C} = \frac{Ue^{+j0^\circ}}{X_Ce^{+j90^\circ}} = I_Ce^{+j90^\circ}.$$

2. Нахождение тока всей цепи

Геометрическое построение для определенной величины и фазы общего тока представлено на рис.1.28, где I_{aK} , I_a – активные составляющие тока в ветви с катушкой I_K и общего тока I , I_{pK} , I_p – реактивные составляющие в ветви с катушкой I_K и общего тока I . Следует помнить, что *активная и реактивная составляющие тока – это условные величины*, не имеющие физического смысла в последовательной схеме замещения, но удобные для расчётов.

Из векторной диаграммы следует, что

$$I_a = I_R + I_{aK}, \quad I_p = I_{pK} - I_C.$$

Следовательно, величина общего тока

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2},$$

а угол сдвига фаз (между общим током и приложенным напряжением)

$$\operatorname{tg}\varphi = I_p / I_a = (I_{pK} - I_C) / (I_R + I_{aK}).$$

В комплексной форме входной ток I запишется в виде

$$\underline{I} = Ie^{-j\varphi}.$$

Данная векторная диаграмма построена в предположении, что ёмкостный ток I_C меньше реактивной индуктивной составляющей тока в катушке I_{pK} . Поэтому общий ток I отстает по фазе от напряжения. Такая цепь носит активно-индуктивный характер. Если бы ёмкостный ток I_C был больше реактивной индуктивной составляющей тока в катушке I_{pK} , то ток, потребляемый цепью из сети, опережал по фазе приложенное напряжение и цепь носила бы активно-ёмкостный характер.

3. Расчет мощностей

Все виды мощностей можно рассчитать используя следующие соотношения:

- активную мощность цепи с резистором R_1 $P_{R_1} = R_1 I_R^2$,
- активную мощность цепи с индуктивной катушкой $P_K = R_K I_K^2$,
- активную мощность всей цепи $P = P_R + P_K$,
- реактивную (индуктивную) мощность катушки $Q_K = X_K I^2$,
- реактивную (ёмкостную) мощность конденсатора $Q_C = -X_C I_C^2$,
- реактивную мощность всей цепи $Q = Q_K + Q_C$,
- полную мощность всей цепи $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$,
- коэффициент мощности в неразветвлённой части электрической

цепи

$$\cos \varphi = P / S.$$

4. Проверка расчетов.

Проверка правильности расчетов электрической цепи проводится по балансу полных мощностей. Из сети потребляется полная мощность

$$S_c = UI,$$

где ток I определен ранее. Найденную выше мощность S назовем потребляемой мощностью – $S_{\text{пот}}$. Относительную погрешность расчетов ΔS определим соотношением $\Delta S = (S_c - S_{\text{пот}}) / S_c \cdot 100\%$. Она не должна превышать 5%

5. Резонанс токов

При равенстве реактивной индуктивной составляющей тока в катушке I_{pK} и ёмкостного тока I_C вектор общего тока I совпадает по фазе с вектором приложенного напряжения, а его величина определяется только активными составляющими токов $I_a = I_R + I_{aK}$. При этом в цепи наступает явление резонанса токов, так как цепь, содержащая реактивные элементы, ведет себя как цепь с чисто активным сопротивлением. При резонансе токов токи в ветвях с реактивными элементами могут значительно превышать ток, потребляемый от источника питания.

Ёмкость конденсатора C_0 при которой в исследуемой цепи (рис.1.27) возникает резонанс токов можно рассчитать двумя способами..

1. Резонанс токов возникает при параллельном соединении индуктивной катушки Z_K и конденсатора C при выполнении условия $B_K = B_C$, где $B_K = \frac{R_K}{Z_K^2}$ - индуктивная проводимость индуктивной катушки Z_K ,

$B_C = \frac{1}{X_C}$ – ёмкостная проводимость конденсатора C , то ёмкость конденсатора при резонансе токов $C_0 = \frac{L_K}{Z_K^2}$.

2. При резонансе токов $I_C = I_{pK}$. По закону Ома сопротивление конденсатора равно $X_C = U/I_C$, а $X_C = 1/\omega C$, $\omega = 2\pi f$. Тогда $C_0 = 10^6/2\pi f X_C$. Это и есть ёмкость конденсатора, при которой происходит резонанс токов.

1.8. Повышение коэффициента мощности в электрической цепи

Активная мощность потребителя определяется формулой

$$P = U I \cos \varphi.$$

Величину $\cos \varphi$ здесь называют коэффициентом мощности. Ток в линии питающей потребителя с заданной мощностью P равен

$$I = P / (U \cos \varphi).$$

и будет тем больше, чем меньше $\cos \varphi$. При этом возрастают потери в питающей линии. Для их снижения желательно увеличивать $\cos \varphi$. Большинство потребителей имеет активно-индуктивный характер нагрузки. Увеличение $\cos \varphi$ возможно путем компенсации индуктивной составляющей тока путем подключения параллельно нагрузке конденсатора (рис. 1.29).

Расчет ёмкости дополнительного конденсатора для обеспечения заданного $\cos \varphi$ проводится следующим образом. Пусть известны параметры нагрузки P_H , U и I_H . Можно определить $\cos \varphi_H$

$$\cos \varphi_H = P / (U I_H).$$

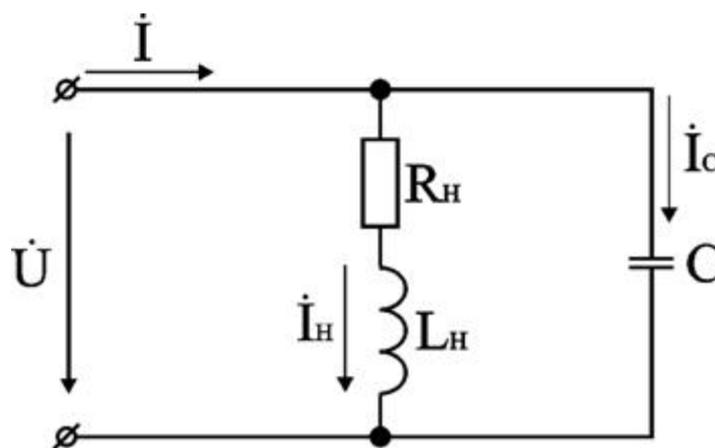


Рис. 1.29 Схема электрической цепи для повышения $\cos \varphi$

Из рис.1.28 следует, что подключение емкости не изменяет активную составляющую нагрузки

$$I_{на} = I_n \cos \varphi_n = P_n / U.$$

Реактивная составляющая нагрузки $I_{нр}$ может быть выражена через $\operatorname{tg} \varphi_n$ (рис.1.28)

$$I_{нр} = I_{на} \operatorname{tg} \varphi_n.$$

При подключении емкости величина $I_{нр}$ уменьшается на величину I_C .

Если задано, что коэффициент мощности в питающей линии должен быть равен $\cos \varphi$, то можно определить величину реактивной составляющей тока в линии

$$I_p = I_a \operatorname{tg} \varphi.$$

Уменьшение реактивной составляющей нагрузки с $I_{нр}$ до I_p определяет величину тока компенсирующей емкости

$$I_C = I_{нр} - I_p = I_a (\operatorname{tg} \varphi_n - \operatorname{tg} \varphi).$$

Подставляя в эти уравнения, значение $I_{на}$ и учитывая, что $I_C = U / X_C = U \omega C$, получим $U \omega C = P_n / U \cdot (\operatorname{tg} \varphi_n - \operatorname{tg} \varphi)$, откуда для емкости конденсатора имеем

$$C = P_n / \omega U^2 \cdot (\operatorname{tg} \varphi_n - \operatorname{tg} \varphi).$$

Для больших значений P_n величина емкости C может оказаться слишком большой, что технически трудно реализовать. В этом случае используют синхронные компенсирующие машины.

Глава 2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ЦЕПЯМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Расчет цепей переменного тока с последовательным соединением элементов

2.1.1. Расчет электрических параметров цепи.

Задача 1. Электрическая цепь, показанная на рис. 2.1, питается от источника синусоидального тока с частотой 200 Гц и напряжением 120 В. Дано: $R = 4 \text{ Ом}$, $L = 6,37 \text{ мГн}$, $C = 159 \text{ мкФ}$.

Вычислить ток в цепи, напряжения на всех участках, активную, реактивную, и полную мощности. Построить векторную диаграмму, треугольники сопротивлений и мощностей.

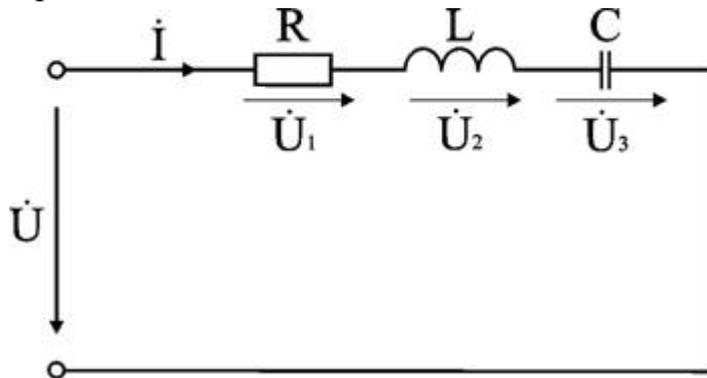


Рис. 2.1. Схема электрической цепи
Анализ и решение задачи 1.

1. Вычисление сопротивлений участков и всей цепи

Индуктивное реактивное сопротивление

$$X_L = 2\pi f L = 2 \times 3,14 \times 200 \times 6,37 \cdot 10^{-3} = 8 \text{ Ом.}$$

Емкостное реактивное сопротивление

$$X_C = 1 / (2\pi f C) = 1 / (2 \times 3,14 \times 200 \times 159 \cdot 10^{-6}) = 5 \text{ Ом.}$$

Реактивное и полное сопротивления всей цепи:

$$X = X_L - X_C = 3 \text{ Ом;}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ Ом.}$$

2. Вычисление тока и напряжений на участках цепи

Ток в цепи

$$I = U / Z = 120 / 5 = 24 \text{ А.}$$

Напряжения на участках:

$$U_1 = R I = 96 \text{ В; } U_2 = X_L I = 192 \text{ В; } U_3 = X_C I = 120 \text{ В.}$$

3. Вычисление мощностей

Активная мощность

$$P = R I^2 = U_1 I = 2304 \text{ Вт.}$$

Реактивные мощности:

$$Q_L = X_L I^2 = U_2 I = 4608 \text{ вар}; \quad Q_C = X_C I^2 = U_3 I = 2880 \text{ вар}.$$

Полная мощность цепи

$$S = UI = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} = 2880 \text{ ВА}.$$

4. Расчет цепи методом комплексных чисел

Запишем в комплексном виде сопротивление каждого элемента и всей цепи

$$\underline{R} = 4e^{j0^\circ} = 4 \text{ Ом}; \quad \underline{X}_L = 8e^{+j90^\circ} = j8 \text{ Ом}; \quad \underline{X}_C = 5e^{-j90^\circ} = -j5 \text{ Ом}.$$

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = 4 + j(8 - 5) \text{ Ом}.$$

На комплексной плоскости в масштабе: в 1 см – 2 Ом, построим треугольник сопротивлений (рис. 2.2. а).

Из треугольника определим величину полного сопротивления Z и угол фазового сдвига φ

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = 5 \text{ Ом};$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{3}{4} = 37^\circ.$$

В показательной форме полное сопротивление всей цепи запишется в виде

$$\underline{Z} = Ze^{+j\varphi} = 5e^{+j37^\circ} \text{ Ом}.$$

Примем начальную фазу приложенного к цепи напряжения за ноль и определим по закону Ома ток в данной цепи

$$\underline{I} = \underline{U} / \underline{Z} = 120e^{+j0^\circ} / 5e^{+j37^\circ} = 24e^{-j37^\circ} \text{ А}.$$

Следовательно, в данной цепи ток отстает по фазе от напряжения на угол φ .

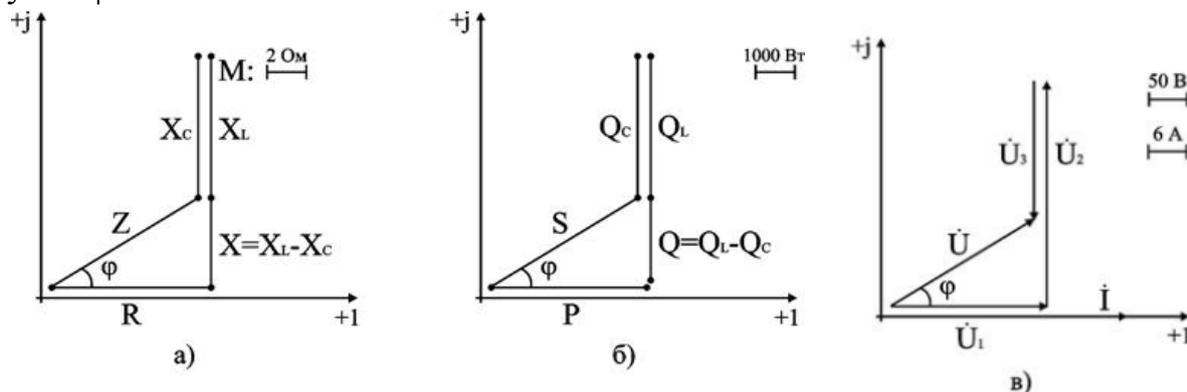


Рис.2.2. Треугольники сопротивлений (а), мощностей (б), векторная диаграмма (в)

Зная величину тока I , определим мощности для отдельных элементов и всей цепи.

$$P = 2304 \text{ Вт}; \quad Q_L = 4608 \text{ вар}; \quad Q_C = 2880 \text{ вар}.$$

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}.$$

Треугольник мощностей в масштабе: в 1 см – 1000 Вт (вар); (ВА), построим (рис. 2.2. б) на основе выражения для полной мощности

$$S^2 = P^2 + (Q_L - Q_C)^2.$$

Для построения векторных диаграмм по току и напряжениям примем начальную фазу тока равной нулю, т.к. ток I в данной схеме является одним и тем же для всех элементов в цепи

$$\dot{I} = I e^{+j0^\circ} = 24 e^{+j0^\circ} \text{ А}.$$

Запишем выражения для напряжений в комплексной форме

$$\dot{U}_1 = R \dot{I} = 96 e^{+j0^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_2 = X_L \dot{I} = 192 e^{+j90^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_3 = X_C \dot{I} = 120 e^{-j90^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U} = \underline{Z} \dot{I} = 120 e^{+j37^\circ} \text{ В}.$$

Выберем масштабы для векторной диаграммы: в 1 см – 6 А; в 1 см – 50 В. Векторная диаграмма напряжений строится на основе второго закона Кирхгофа для данной цепи

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3.$$

Векторная диаграмма цепи показана на рис. 2.2. в. При последовательном соединении элементов построение диаграммы начинают с вектора тока \dot{I} , по отношению к которому ориентируются вектора напряжений на участках цепи: напряжение на активном сопротивлении \dot{U}_1 совпадает с ним по направлению, напряжение на индуктивности \dot{U}_2 опережает его на 90° , на емкости отстает на 90° . Полное напряжение \dot{U} строится как их векторная сумма.

Дополнительные вопросы к задаче 1.

1. Какой характер носит эквивалентное реактивное сопротивление цепи?

По условию задачи $X_L > X_C$, поэтому $X = X_L - X_C$ имеет индуктивный характер. Обратите внимание, что реактивные сопротивления отдельных участков цепи (X_L , X_C) могут быть больше ее полного сопротивления, так в данном случае $X_L > Z$.

2. Как изменяется режим работы цепи при изменении частоты питающего напряжения?

От частоты зависят реактивные сопротивления: X_L прямо пропорционально частоте f , X_C обратно пропорционально f . В рассматриваемой схеме $X_L > X_C$, поэтому при росте частоты X возрастает, ток уменьшается и возрастает угол φ его отставания от напряжения. При уменьшении частоты X уменьшается и при некотором ее значении $X = 0$, т.е. схема ведет себя как чисто активное сопротивление (режим резонанса напряжений, при котором $U_L = U_C$, $Z = R$ и ток наибольший). При дальнейшем уменьшении частоты $X_C > X_L$, Z возрастает, I уменьшается, схема ведет себя как активно-емкостное сопротивление.

Задача 2. Определение параметров потребителя по опытным данным.

Катушка индуктивности (рис. 2.3) подключена к сети с напряжением $U = 100$ В. Ваттметр показывает значение $P_K = 600$ Вт, амперметр: $I = 10$ А. Определить параметры катушки R_K , L_K .

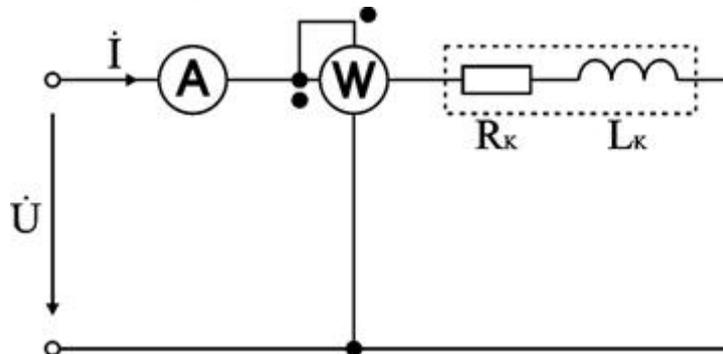


Рис. 2.3. Схема электрической цепи

Анализ и решение задачи 2.

1. Вычисление полного сопротивления катушки

$$Z_K = U / I = 100 / 10 = 10 \text{ Ом.}$$

2. Вычисление активного сопротивления катушки R_K

Ваттметр измеряет активную мощность, которая в данной схеме потребляется активным сопротивлением R_K .

$$R_K = P_K / I^2 = 600 / 100 = 6 \text{ Ом.}$$

3. Вычисление индуктивности катушки L_K

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}; \quad Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = \sqrt{100 - 36} = 8 \text{ Ом;}$$

$$X_K = 2\pi f L_K; \quad L_K = X_K / (2\pi f) = 8 / (2\pi \times 50) = 0,025 \text{ Гн.}$$

Дополнительные вопросы к задаче 2.

1. Как решить задачу другим способом?

Параметры катушки индуктивности можно определить, рассчитав полную мощность S_K и реактивную мощность катушки Q_K .

$$S_K = U I = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ ВА.}$$

$$Q_K = \sqrt{S_K^2 - P_K^2} = \sqrt{1000^2 - 600^2} = 800 \text{ вар.}$$

$$R_K = P_K / I^2 = 6 \text{ Ом; } X_K = Q_K / I^2 = 8 \text{ Ом;}$$

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = 10 \text{ Ом.}$$

2. Записать законы изменения тока и всех напряжений для данной цепи.

Определим угол фазового сдвига между током $i(t)$ и приложенным напряжением $u(t)$

$$\varphi = \arctg(X_K / R_K) = \arctg(8 / 6) = 53^\circ.$$

В цепи с активно-индуктивной нагрузкой напряжение опережает ток на угол $\varphi = 53^\circ$. Амплитуды тока и напряжения определим, зная действующие значения тока и напряжения

$$I_m = \sqrt{2}I = 14,1 \text{ А; } U_m = \sqrt{2}U = 141 \text{ В.}$$

Законы изменения тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ запишутся в следующем виде:

$$i(t) = 14,1 \sin\omega t; \quad u(t) = 141 \sin(\omega t + 53^\circ).$$

Для записи напряжений $u_R(t)$ и $u_L(t)$ определим их величины

$$U_R = R I = 60 \text{ В; } U_{Rm} = \sqrt{2} \cdot 60 = 84,8 \text{ В;}$$

$$U_L = X_L I = 80 \text{ В; } U_{Lm} = \sqrt{2} \cdot 80 = 113 \text{ В.}$$

На активном сопротивлении R_K ток $i(t)$ и напряжение $u_R(t)$ по фазе совпадают. При протекании тока через индуктивность L_K возникает фазовый сдвиг $\varphi = 90^\circ$ между током $i(t)$ и напряжением $u_L(t)$.

$$u_R(t) = 84,8 \sin\omega t; \quad u_L(t) = 113 \sin(\omega t + 90^\circ).$$

2.2. Расчет сложных цепей переменного тока

2.2.1. Расчет цепи с параллельным соединением элементов

К источнику с напряжением 220 В и частотой 50 Гц подключены параллельно два двигателя, активные мощности и коэффициенты мощности которых $P_1 = 0,3 \text{ кВт}$, $P_2 = 0,4 \text{ кВт}$, $\cos \varphi_1 = 0,6$, $\cos \varphi_2 = 0,7$. Начертить электрическую схему замещения цепи. Определить токи каждого двигателя и ток, потребляемый схемой от источника, ее активную, реактивную и полную мощности. Для повышения $\cos \varphi$ цепи до 0,9 подключить параллельно нагрузке конденсатор и определить его емкость, рассчитать ток,

потребляемый схемой от источника в этом режиме. Построить в масштабе векторную диаграмму напряжения и токов.

Анализ и решение задачи 1.

1. Схема замещения каждого двигателя может быть представлена в виде последовательного соединения резистивного и индуктивного элементов, т.к. в двигателе происходит как необратимое преобразование электрической энергии в механическую и тепловую, так и колебательный обмен энергией между магнитным полем двигателя и сетью. Схема замещения представлена на рис. 2.4.

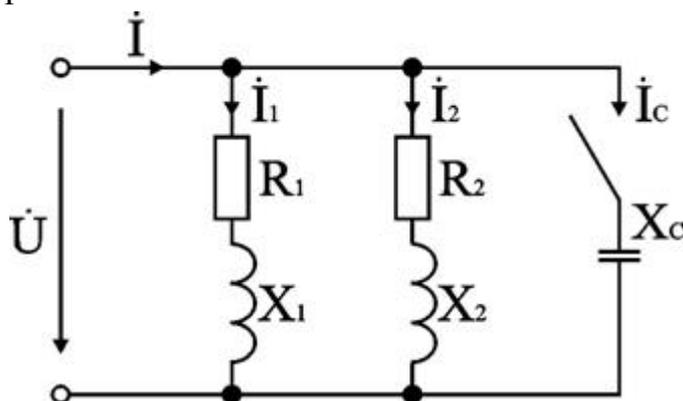


Рис. 2.4. Расчетная схема электрической цепи

2. Токи двигателей рассчитываются по паспортным данным:

$$I_1 = \frac{P_1}{U \cos \varphi_1} = \frac{0,3 \cdot 10^3}{220 \cdot 0,7} = 2,27 \text{ A}; \quad I_2 = \frac{P_2}{U \cos \varphi_2} = \frac{0,4 \cdot 10^3}{220 \cdot 0,7} = 2,6 \text{ A}.$$

Сдвиги токов по фазе по отношению к напряжению: $\varphi_1 = 53,1^\circ$, $\varphi_2 = 45,5^\circ$.

3. Мощности ветвей приведены в исходных данных, поэтому расчет схемы удобно вести через треугольники мощностей.

Реактивные мощности двигателей:

$$Q_1 = U I_1 \sin \varphi_1 = 220 \cdot 2,27 \cdot 0,8 = 399 \text{ вар};$$

$$Q_2 = U I_2 \sin \varphi_2 = 220 \cdot 2,6 \cdot 0,713 = 407 \text{ вар}.$$

Активная и полная мощности всей цепи:

$$P = P_1 + P_2 = 300 + 400 = 700 \text{ Вт};$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = 399 + 407 = 806 \text{ вар};$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{700^2 + 806^2} = 1086 \text{ ВА}.$$

Ток в цепи источника

$$I = S / U = 1068 / 220 = 4,85 \text{ A}.$$

Коэффициент мощности схемы

$$\cos \varphi = P / S = 700 / 1068 = 0,655.$$

4. Рассчитаем емкость конденсатора, необходимую для повышения коэффициента мощности схемы до $\cos \varphi' = 0,9$.

Включение конденсатора параллельно нагрузке не изменяет ее активную мощность, а уменьшает реактивную и полную мощности, потребляемые всей схемой от источника. Поэтому по активной мощности цепи и заданному значению $\cos \varphi'$ определим полную мощность цепи

$$S' = P / \cos \varphi' = 700 / 0,9 = 777,8 \text{ ВА.}$$

Реактивная мощность цепи

$$Q' = \sqrt{S'^2 - P^2} = \sqrt{777,8^2 - 700^2} = 339 \text{ вар.}$$

Реактивная мощность всей цепи равна алгебраической сумме реактивных мощностей ее участков. В данном случае $Q' = Q - Q_C$, поэтому мощность конденсатора

$$Q_C = Q - Q' = 806 - 339 = 467 \text{ вар.}$$

Многоугольник мощностей показан на рис. 2.5.

Ток в цепи конденсатора и его сопротивление:

$$I_C = Q_C / U = 467 / 220 = 2,12 \text{ А}; \quad X_C = U / I_C = 220 / 2,12 = 103 \text{ Ом.}$$

Емкость конденсатора

$$C = 1 / (2\pi f X_C) = 1 / (2\pi \cdot 50 \cdot 103) = 30,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 30,7 \text{ мкФ.}$$

Результирующий ток источника

$$I' = S' / U = 777,8 / 220 = 3,535 \text{ А.}$$

На рис. 2.6 приведены векторные диаграммы напряжения и токов схемы без конденсатора (а) и после подключения параллельно нагрузке конденсатора (б).

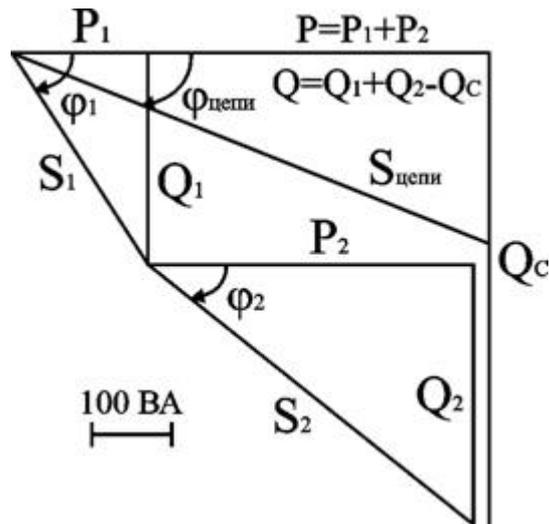


Рис. 2.5. Многоугольник мощностей

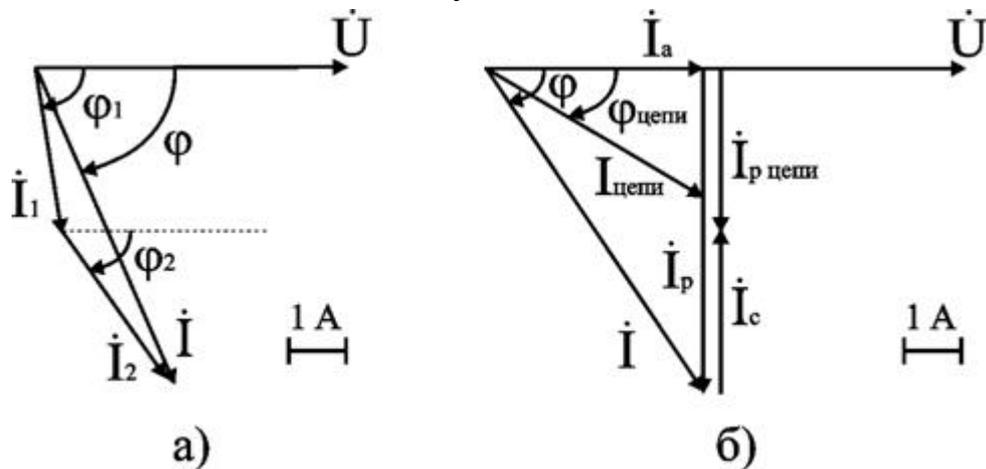


Рис. 2.6. Векторные диаграммы: схемы без конденсатора (а), схемы с конденсатором (б)

5. Если в исходных данных приведены сопротивления ветвей или их токи и коэффициенты мощности, то расчет удобно вести через треугольники токов (их активные и реактивные составляющие).

Активные составляющие токов ветвей:

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = 2,27 \cdot 0,6 = 1,362 \text{ A};$$

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = 2,6 \cdot 0,7 = 1,818 \text{ A};$$

$$I_a = I_{1a} + I_{2a} = 1,362 + 1,818 = 3,18 \text{ A}.$$

Реактивные составляющие токов ветвей:

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1 = 2,27 \cdot 0,8 = 1,818 \text{ A};$$

$$I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2 = 2,6 \cdot 0,713 = 1,852 \text{ A};$$

$$I_p = I_{1p} + I_{2p} = 1,818 + 1,852 = 3,67 \text{ A}.$$

Полный ток источника

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{3,18^2 + 3,67^2} = 4,856 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности эквивалентной нагрузки

$$\cos \varphi = I_a / I = 3,18 / 4,854 = 0,655.$$

Реактивная составляющая тока источника после подключения конденсатора

$$I'_p = I_a \operatorname{tg} \varphi' = 3,18 \cdot 0,484 = 1,54 \text{ А.}$$

Ток конденсатора $I_C = I_p - I'_p = 3,67 - 1,54 = 2,13 \text{ А.}$

Далее определяются X_C и C , как было рассмотрено выше.

Дополнительные вопросы к задаче 1.

1. Как изменятся токи в схеме, если параллельно двигателю подключить осветительную (чисто активную) нагрузку?

За счет увеличения активной составляющей (освещение) ток источника возрастет, токи в ветвях схемы не изменятся.

2. Как рассчитать токи в схеме комплексным методом?

Для расчета связываем векторную диаграмму с комплексной плоскостью; для упрощения выкладок один из векторов, например напряжение, направим по действительной оси, т.е. $U = 220 \text{ В.}$

Токи в ветвях в комплексной форме:

$$\hat{I}_1 = 2,27e^{-j53,1^\circ} = 2,27 (\cos 53,1^\circ - j \sin 53,1^\circ) = (1,36 - j 1,81) \text{ А;}$$

$$\hat{I}_2 = 2,6e^{-j45,5^\circ} = 2,6 (\cos 45,5^\circ - j \sin 45,5^\circ) = (1,82 - j 1,84) \text{ А.}$$

По первому закону Кирхгофа ток источника

$$\hat{I} = \hat{I}_1 + \hat{I}_2 = 1,36 - j 1,81 + 1,82 - j 1,84 = 3,18 - j 3,66 = 4,85e^{-j49^\circ} \text{ А.}$$

Мощность цепи в комплексной форме:

$$\underline{S} = \hat{U} \hat{I} = 220 \cdot 4,85e^{-j49^\circ} = 1067e^{-j49^\circ} = (700 + j 806) \text{ ВА;}$$

$$S = 1067 \text{ ВА; } P = 700 \text{ Вт; } Q = 806 \text{ вар.}$$

Батарея конденсаторов рассчитывается, как это было рассмотрено выше.

2.2.2. Расчет разветвленной электрической цепи

Задача 2. На участке механической обработки установлено электрооборудование: 1) привод металлорежущих станков – асинхронные двигатели, для которых известны параметры $R_1 = 4 \text{ Ом; } \cos \varphi_1 = 0,8$; 2) осветительные приборы – люминесцентные лампы, сопротивление которых $R_2 = 8 \text{ Ом}$; 3) батарея конденсаторов, емкостью $C = 200 \text{ мкФ}$, для повыше-

ния коэффициента мощности. К участку электрическая энергия подводится по кабельной линии сопротивлением $R_{Л} = 1,8 \text{ Ом}$ и $X_{Л} = 0,6 \text{ м}$ от источника с напряжением $U_{С} = 660 \text{ В}$. Вычислить токи на всех участках цепи и напряжение, подведенное к потребителям $U_{П}$.

Анализ и решение задачи 2.

2. Определим неизвестные параметры и запишем в комплексном виде сопротивления всех элементов цепи.

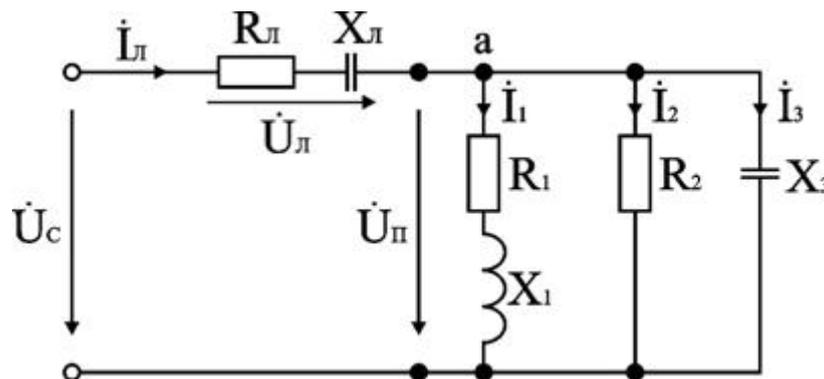


Рис. 2.7. Расчетная электрическая цепь

Линия электропередачи

$$R_{Л} = 1,8 \text{ Ом}; \quad X_{Л} = 0,6 \text{ Ом};$$

$$Z_{Л} = \sqrt{R_{Л}^2 + X_{Л}^2} = 1,9 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi_{Л} = R_{Л} / Z_{Л} = 0,947;$$

$$\varphi_{Л} = \arctg(-X_{Л} / R_{Л}) = -19^\circ; \quad \underline{Z}_{Л} = 1,9e^{-j19^\circ} \text{ Ом}.$$

Асинхронные двигатели

$$R_1 = 4 \text{ Ом}; \quad \cos \varphi_1 = 0,8; \quad Z_1 = R_1 / \cos \varphi_1 = 4 / 0,8 = 5 \text{ Ом};$$

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} = 3 \text{ Ом};$$

$$\varphi_1 = \arccos R_1 / Z_1 = 37^\circ; \quad \underline{Z}_1 = 5e^{+j37^\circ} \text{ Ом}.$$

Люминесцентные лампы

$$R_2 = 8 \text{ Ом}; \quad \varphi_2 = 0^\circ; \quad \underline{Z}_2 = 8e^{+j0^\circ} \text{ Ом}.$$

Конденсатор

$$C_3 = 200 \text{ мкФ}; \quad X_3 = 1 / (2\pi f C) = 1 / (2\pi \cdot 50 \cdot 200 \cdot 10^{-6}) = 16 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = 16e^{-j90^\circ} \text{ Ом}.$$

3. Расчет комплексного эквивалентного сопротивления $\underline{Z}_{ЭКВ}$ схемы замещения.

В схеме замещения к линии электропередачи с сопротивлением Z_L параллельно подключена группа потребителей с сопротивлениями Z_1, Z_2, Z_3 , поэтому для расчета $Z_{\text{ЭКВ}}$ необходимо сначала определить их общее сопротивление Z_{Π} , используя метод проводимостей.

Определим активные и реактивные проводимости параллельно включенных ветвей

$$q_1 = R_1 / Z_1^2 = 4 / 25 = 0,16 \text{ См}; \quad b_1 = X_1 / Z_1^2 = 3 / 25 = 0,12 \text{ См};$$

$$q_2 = 1 / R_2 = 1 / 8 = 0,125 \text{ См}; \quad b_3 = 1 / -X_3 = -1 / 16 = -0,0625 \text{ См}.$$

Определим активную, реактивную и полную проводимости параллельного участка цепи

$$q_{\Pi} = q_1 + q_2 = 0,16 + 0,125 = 0,285 \text{ См};$$

$$b_{\Pi} = b_1 - b_3 = 0,12 - 0,0625 = 0,0575 \text{ См};$$

$$Y_{\Pi} = \sqrt{q_{\Pi}^2 + b_{\Pi}^2} = 0,29 \text{ См}.$$

Определим активное, реактивное и полное сопротивления параллельного участка цепи

$$Z_{\Pi} = 1 / Y_{\Pi} = 1 / 0,29 = 3,45 \text{ Ом}; \quad R_{\Pi} = q_{\Pi} Z_{\Pi}^2 = 3,38 \text{ Ом}; \quad X_{\Pi} = b_{\Pi} Z_{\Pi}^2 = 0,68 \text{ Ом}$$

$$\varphi_{\Pi} = \arctg(X_{\Pi} / R_{\Pi}) = \arctg 0,2 = 11^{\circ}; \quad \underline{Z}_{\Pi} = 3,45 e^{+j11^{\circ}} \text{ Ом}.$$

Нарисуем эквивалентную схему замещения (рис. 2.8), где все сопротивления включены последовательно

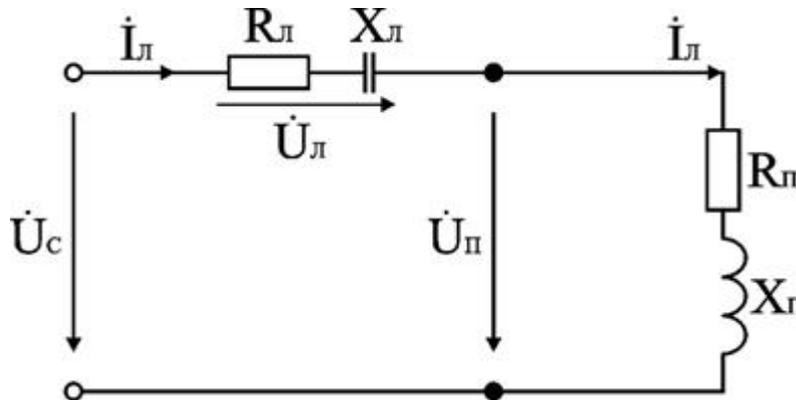


Рис. 2.8. Эквивалентная схема замещения

Определим эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления всей цепи

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_L + R_{\Pi} = 1,8 + 1,38 = 5,18 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{ЭКВ}} = -X_L + X_{\Pi} = -0,6 + 0,68 = 0,08 \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{R_{\text{ЭКВ}}^2 + X_{\text{ЭКВ}}^2} = 5,1806 \text{ Ом};$$

$$\varphi_{\text{ЭКВ}} = \arctg(X_{\text{ЭКВ}} / R_{\text{ЭКВ}}) = 1^{\circ}; \quad \underline{Z}_{\text{ЭКВ}} = 5,1806 e^{+j1^{\circ}} \text{ Ом}.$$

4. Определим токи и напряжения на всех участках цепи.

Ток в линии электропередачи

$$\dot{I}_Л = \dot{U}_C / \underline{Z}_{\text{ЭКВ}} = 660e^{+j0^\circ} / 5,181e^{+j1^\circ} = 127,4e^{-j1^\circ} \text{ A.}$$

Падение напряжения в линии электропередачи

$$\dot{U}_Л = \underline{Z}_Л \dot{I}_Л = 1,9e^{+j19^\circ} \cdot 127,4e^{-j1^\circ} = 242e^{-j20^\circ} \text{ В.}$$

Напряжение, подаваемое на потребители

$$\dot{U}_П = \underline{Z}_П \dot{I}_Л = 3,45e^{+j11^\circ} \cdot 127,4e^{-j1^\circ} = 440e^{+j10^\circ} \text{ В.}$$

Токи в параллельных ветвях

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_П / \underline{Z}_1 = 440e^{+j10^\circ} / 5e^{+j37^\circ} = 88e^{-j27^\circ} \text{ A;}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_П / \underline{Z}_2 = 440e^{+j10^\circ} / 8e^{+j0^\circ} = 55e^{+j10^\circ} \text{ A;}$$

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_П / \underline{Z}_3 = 440e^{+j10^\circ} / 16e^{-j90^\circ} = 27,5e^{+j100^\circ} \text{ A.}$$

5. Построим векторные диаграммы для токов и напряжений.

Запишем второй закон Кирхгофа для схемы замещения (рис. 2.9)

$$\dot{U}_C = \dot{U}_П + \dot{U}_Л; \quad 660e^{+j0^\circ} = 440e^{+j10^\circ} + 242e^{-j20^\circ}.$$

Векторную диаграмму для напряжений строим на комплексной плоскости (рис. 2.9), направив вектор напряжения \dot{U}_C по действительной оси, т.е. $\dot{U}_C = 660e^{+j0^\circ}$ В. Построение произведем в масштабе: в 1 см – 60 В.

Векторную диаграмму для токов строим на основании первого закона Кирхгофа, записанного для узла «а» схемы замещения (рис. 2.7)

$$\dot{I}_Л = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3; \quad 127,4e^{-j1^\circ} = 88e^{-j27^\circ} + 55e^{+j10^\circ} + 27,5e^{+j100^\circ}.$$

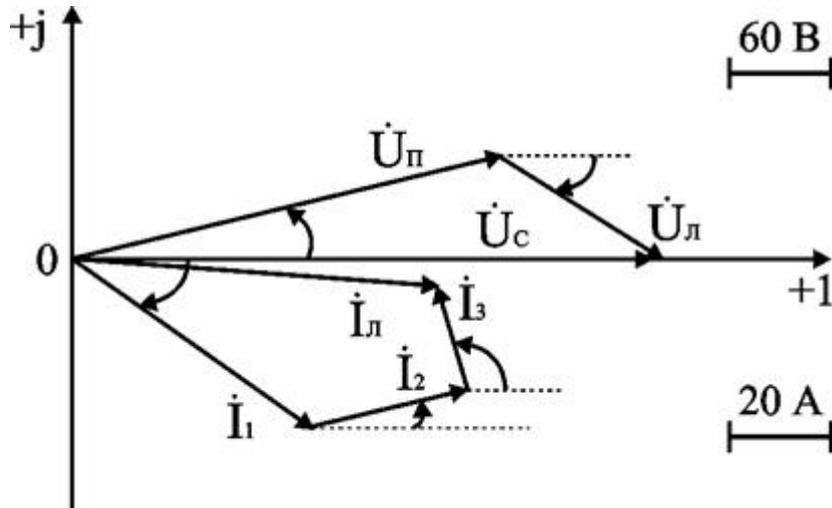


Рис. 2.9. Векторная диаграмма

Дополнительные вопросы к задаче 2.

1. Как проверить правильность произведенных расчетов.

Приближенно расчеты проверяются по векторной диаграмме. Построив в масштабе вектора напряжений \dot{U}_Π и $\dot{U}_Л$, измеряют величину суммарного вектора \dot{U}_C и сравнивают с исходной $U_C = 660$ В. Вектора токов \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , \dot{I}_3 строят на комплексной плоскости с соблюдением масштаба по величине и углов фазового сдвига φ_1 , φ_2 , φ_3 относительно действительной оси. Изменяют величину и фазу суммарного вектора и сравнивают с расчетным значением $\dot{I}_Л$.

Точная проверка расчетов, как и в цепях постоянного тока, производится составлением баланса полных мощностей.

Определим активные и реактивные мощности для всех элементов цепи.

$$P_Л = R_Л I_Л^2 = 1,8 \cdot 127,4^2 = 29215 \text{ Вт};$$

$$Q_Л = X_Л I_Л^2 = -0,6 \cdot 127,4^2 = -9738 \text{ вар};$$

$$P_1 = R_1 I_1^2 = 4 \cdot 88^2 = 30976 \text{ Вт}; Q_1 = X_1 I_1^2 = 3 \cdot 88^2 = 23232 \text{ вар};$$

$$P_2 = R_2 I_2^2 = 8 \cdot 55^2 = 24200 \text{ Вт}; Q_3 = X_3 I_3^2 = -16 \cdot 27,5^2 = -12100 \text{ вар}.$$

Определим расходуемые мощности для всей цепи

$$P_{\text{экв}} = P_1 + P_2 + P_Л = 84091 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{экв}} = Q_1 + Q_3 + Q_Л = 23232 - 12100 - 9738 = 1493 \text{ вар};$$

$$S_{\text{экв}} = \sqrt{P_{\text{экв}}^2 + Q_{\text{экв}}^2} = 84103 \text{ ВА}.$$

Определим величину полной мощности поставляемой из сети

$$S_C = U_C I_Л = 660 \cdot 127,4 = 84084 \text{ ВА}.$$

Определим погрешность расчетов по балансу мощностей, сравнив полные мощности $S_{\text{экв}}$ и S_C .

$$\Delta S = \frac{S_C - S_{\text{экв}}}{S_C} \cdot 100\% = \frac{84085 - 84103}{84085} \cdot 100\% = -0,02\%$$

Баланс мощностей сошелся полностью, следовательно расчеты произведены верно.

2. Как изменится схема замещения цепи, если напряжение U_C будет подводиться по воздушной линии электропередачи.

Схема замещения воздушной линии электропередачи представляется в виде последовательного соединения резистивного $R_Л$ и индуктивного $X_Л$ элементов.

Глава 3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

3.1. Указания к выполнению контрольных работ

Контрольные задания по электротехнике предусматривают выполнение контрольных работ по теме «Однофазные электрические цепи переменного тока». Номер варианта решаемой задачи определяется номером студента в списочном составе группы. При количестве студентов больше 25 человек, 26 номер решает первый вариант, 27 – второй и т.д.

Контрольная работа выполняется на формате А4 в компьютерном или рукописном варианте. Титульный лист для контрольной работы приведен в приложении 1. Бланки контрольных работ приведены в приложении 2.

При оформлении задания необходимо соблюдать последовательность и рубрикацию этапов расчета. При выполнении расчетов дается формула в общем виде, подставленные в нее численные значения и конечный результат; при расчете характеристик все формулы приводятся в общем виде, а цифровые результаты представляются в таблицах. Все необходимые схемы, диаграммы, графики вычерчиваются карандашом с применением чертежных инструментов с соблюдением масштабов и ГОСТов. Если задание не зачтено, необходимые исправления выполняются на дополнительных страницах и представляются на повторную проверку вместе с первоначальным вариантом расчетов.

3.2. Методические указания к выполнению контрольных работ

При выполнении контрольных работ необходимо понять запомнить содержание основных терминов, которые используются в цепях переменного тока, особенности применения законов Ома и Кирхгофа для расчета этих цепей, режимы работы электрических цепей при разных видах нагрузки.

3.2.1. Основные термины и понятия, используемые в цепях переменного тока.

Переменные ЭДС, напряжения и токи изменяются по синусоидальному закону:

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_e), u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u), i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Основные параметры синусоидальных сигналов:

I_m, U_m, E_m – амплитуды тока, напряжения, ЭДС;

ω – циклическая частота, $\omega = 2\pi f$;

f – частота, $f = 1/T$;

T – период;

ψ_i, ψ_u, ψ_e – начальные фазы тока, напряжения, ЭДС;

e, u, i – мгновенные значения ЭДС, напряжения и тока.

Величины i , I_m – измеряются в амперах, величины U , U_m , e , E_m – в вольтах; величина T (период) измеряется в секундах (с); частота f – в герцах (Гц), циклическая частота ω имеет размерность рад/с.

Значения начальных фаз ψ_i , ψ_u , ψ_e могут измеряться в радианах или градусах.

Величина ψ_i , ψ_u , ψ_e зависит от начала отсчета времени $t = 0$. Положительное значение откладывается влево, отрицательное – вправо.

Для сравнения действий постоянного и переменного токов вводят понятие «Действующее значение переменного тока».

Действующее значение переменного тока численно равно такому постоянному току, при котором за время равное одному периоду в проводнике с сопротивлением R выделяется такое же количество тепловой энергии, как и при переменном токе.

Для любой из синусоидальных величин действующее значение определяется через амплитудное делением его на $\sqrt{2} = 1,41$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Условились, что все измерительные приборы показывают действующие значения. Например, 220 В – действующее значение, тогда $u(t) = 310 \sin \omega t$.

В цепях переменного тока выделяют следующие виды сопротивлений.

Активное. Активным называют сопротивление резистора. Единицей измерения сопротивления является Ом. Сопротивление резистора не зависит от частоты.

Реактивное. В разделе реактивные выделяют три вида сопротивлений: индуктивное X_L , емкостное X_C и собственно реактивное. Для индуктивного сопротивления выше была получена формула $X_L = \omega L$. Единицей измерения индуктивного сопротивления также является Ом. Величина X_L линейно зависит от частоты.

Для емкостного сопротивления выше была получена формула $X_C = 1 / \omega C$. Единицей измерения емкостного сопротивления является Ом. Величина X_C зависит от частоты по обратно-пропорциональному закону. Просто реактивным сопротивлением цепи называют величину $X = X_L - X_C$.

Полное сопротивление. Полным сопротивлением цепи называют величину

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

Из этого соотношения следует, что сопротивления Z , R и X образуют треугольник: Z – гипотенуза, R и X – катеты. Для удобства в этом треугольнике рассматривают угол φ , который определяют уравнением

$$\varphi = \arctg((X_L - X_C)/R),$$

и называют углом сдвига фаз. С учетом него можно дать дополнительные связи

$$R = Z \cos \varphi, \quad X = Z \sin \varphi.$$

По аналогии с мощностью в цепях постоянного тока $P = U I$, в цепях переменного тока рассматривают мгновенную мощность $p = u i$, активную мощность P , реактивные мощности Q_L , Q_C , и Q и полную мощность S . Для их определения используют формулы:

$$P = U I,$$

где U и I действующие значения напряжения и тока. Единицей измерения мощности P является Ватт (Вт).

Для определения реактивной индуктивной мощности имеются формулы

$$Q_L = (U_m I_m)/2 \text{ или } Q_L = I^2 X_L.$$

Единицей ее измерения выбрали вар (вольт-ампер реактивный).

По аналогии с Q_L , вводят величину $Q_C = I^2 X_C$, которую называют реактивной емкостной мощностью. Единицей ее измерения также является вар.

Если в цепи присутствуют элементы R , L и C , то активная и реактивная мощности определяются уравнениями

$$P = U I \cos \varphi, \quad Q = Q_L - Q_C, \quad Q = U I \sin \varphi,$$

где φ – угол сдвига фаз.

Вводят понятие полной мощности цепи

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

Еще S можно записать в виде

$$S = U I.$$

Единицей измерения полной мощности является В·А – вольт-ампер.

3.2.2. Особенности расчета цепей переменного тока при разных видах нагрузки.

При расчете реальные электрические цепи заменяются схемами замещения, в которых потребители электрической энергии заменяются резисторами, индуктивностями, конденсаторами или их сочетаниями с соответствующими сопротивлениями R , X_L и X_C . Расчет цепей переменного тока производится также на основе законов Ома и Кирхгофа. Поскольку синусоиды токов и напряжений участков цепи в общем случае сдвинуты относительно друг друга по фазе на угол φ , применение законов для действующих значений токов и напряжений возможно только в векторной или комплексной форме.

Полное сопротивление Z на комплексной плоскости изображается в виде треугольника сопротивлений, в котором величина угла фазового сдвига φ и его знак определяются соотношением между реактивной и активной составляющими полного сопротивления.

При последовательном соединении элементов расчет цепи производится по закону Ома и второму закону Кирхгофа. Для расчета цепи с параллельным соединением используется закон Ома и первый закон Кирхгофа. Иногда для упрощения расчетов сопротивлений ветвей переходят к проводимостям: активной, реактивной и полной. Разветвленные электрические цепи рекомендуется рассчитывать с применением комплексных чисел. Расчет цепей для контроля его правильности и лучшего понимания целесообразно сопровождать построением векторных диаграмм, треугольников сопротивлений и мощностей.

Характер нагрузки цепи переменного тока определяется параметрами потребителя и может быть активным, активно-индуктивным и активно-емкостным. На активную составляющую нагрузки из сети расходуется активная мощность P , которая определяется формулами

$$P = U I \cos \varphi, \quad P = S \cos \varphi.$$

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ определяет, какая часть полной мощности S расходуется потребителем на совершение полезной работы. Большинство потребителей имеют активно-индуктивный характер нагрузки. Для компенсации индуктивной составляющей подключается емкостная нагрузка, например, батарея конденсаторов. При полной компенсации $\cos \varphi = 1$, и из сети потребляется только активная мощность. В цепи с параллельным соединением возникает резонанс токов, а в цепи с последовательным соединением – резонанс напряжений.

3.3. Контрольная работа №1. Расчёт однофазных цепей переменного тока

Задача №1. К автоматической линии фасовки пищевых продуктов по параллельной схеме подводится электрическая энергия от источника переменного напряжения U_n . На линии установлено электрооборудование, технические параметры которого приведены в таблице 3.1:

1. группа асинхронных двигателей - привод транспортёров;
2. осветительные лампы;
3. батарея конденсаторов - для компенсации реактивной мощности асинхронных двигателей и повышения тем самым коэффициента мощности ($\cos \varphi$) всей энергоустановки.

Требования к контрольному заданию.

1. По условию задачи составить реальную схему электрической цепи.
2. На основе реальной схемы составить расчётную схему (схему замещения).

3. Вычислить неизвестные параметры группы асинхронных двигателей.

4. Вычислить сопротивление X_3 батареи конденсаторов.

5. Записать в комплексной форме сопротивления каждой группы потребителей.

6. Вычислить токи всех потребителей, приняв начальную фазу напряжения питания U_n за ноль. Записать все токи в комплексной форме.

7. Построить в масштабе векторную диаграмму напряжения U_n и всех токов. По первому закону Кирхгофа $\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3$ определить ток I , потребляемый из сети.

Таблица 3.1

Номер варианта	$U_n, В$	Асинхронные двигатели				Осветительные лампы	Емкость
		$R_1, Ом$	$X_1, Ом$	$Z_1, Ом$	$\cos\varphi_1$	$R_2, Ом$	$C_3, мкФ$
1	220	10		30		10	100
2	220		15	40		15	120
3	220	15		30		20	110
4	220		20	40		18	130
5	220			40	0,6	16	140
6	220		30		0,75	12	150
7	220	25			0,75	26	160
8	220			26	0,8	20	170
9	220		22		0,85	14	180
10	220	20			0,75	10	100
11	220	20	10			18	100
12	220	20		30		12	110
13	220		15	30		14	120
14	380	20	25			15	130
15	380	15		30		17	140
16	380		18		0,6	12	150
17	380			12	0,7	18	160
18	380	25			0,9	14	170
19	380		28		0,85	18	180

Окончание таблицы 3.1

Номер варианта	U _п , В	Асинхронные двигатели				Осветительные лампы	Емкость
		R ₁ , Ом	X ₁ , Ом	Z ₁ , Ом	cosφ ₁	R ₂ , Ом	C ₃ , мкФ
20	380	15	18			14	200
21	220			50	0,65	25	160
22	220		10	40		20	140
23	380	25		50		10	220
24	380		30		0,2	5	140
25	380			45	0,6	18	100

8. Вычислить активную, реактивную и полную мощности каждой группы потребителей и всей энергоустановки.

9. Произвести проверку правильности расчётов по балансу полных мощностей. Бланк задания для контрольной работы №1 приведен в приложении 2.

3.4. Контрольная работа №2. Расчёт сложной однофазной цепи

Задача №1 (для нечетных вариантов).

К сварочному участку по кабельной линии электропередачи, имеющей сопротивления R_л и X_л, подводится электрическая энергия от источника с напряжением U_с. На участке установлено электрооборудование с напряжением питания U_п (табл.3.2):

1. сварочные трансформаторы;
2. группа асинхронных двигателей – привод транспортеров;
3. нагревательные печи.

Таблица 3.2

Номер варианта	U _п , В	Линия передачи		Сварочные трансформаторы				Асинхронные двигатели				Нагревательные печи R ₃ , Ом
		R _л , Ом	X _л , Ом	R ₁ , Ом	X ₁ , Ом	Z ₁ , Ом	cosφ ₁	R ₂ , Ом	X ₂ , Ом	Z ₂ , Ом	cosφ ₂	
1	220	2	1,5	15			0,7	5	10			15
2	220	1,5	2		20		0,7	5		15		10
3	220	1	1,5			20	0,7	10			0,6	15
4	220	1,5	1			30	0,75		10	20		20
5	220	2	1		15		0,75		20		0,7	25
6	380	1	2	15			0,75			20	0,7	10
7	380	1,5	1,5	15	15			10	15			15
8	380	2	0,8	15		30		10		20		20
9	380	0,8	2		15	30			5	20		15
10	380	1,5	0,5	20	10				20		0,7	20
11	380	0,5	1,5	20		40				25	0,8	20

Номер варианта	U _п , В	Линия передачи		Сварочные трансформаторы				Асинхронные двигатели				Нагревательные печи R ₃ , Ом
		R _л , Ом	X _л , Ом	R ₁ , Ом	X ₁ , Ом	Z ₁ , Ом	cosφ ₁	R ₂ , Ом	X ₂ , Ом	Z ₂ , Ом	cosφ ₂	
12	220	1	0,5		10	30		10		20		15
13	220	0,5	1	20			0,8	10	15			20
14	220	0,5	0,5		20		0,8		5	20		15
15	220	0,5	0,75	15	18			12	20			12
16	220	0,75	2		10	20		15		26		15
17	380	2	1,2	10		18		20			0,8	20
18	380	2	0,8			30	0,7	10		16		18
19	380	0,5	1	15		20			15	26		16
20	380	0,75	1,5	18	12					14	0,7	24
21	380	0,8	1,6	8			0,8		10	20		10
22	380	0,5	1,2		10		0,6	8	15			15
23	380	1,6	0,8	10	15					25	0,5	20
24	380	2	1		15	30				20	0,8	25
25	380	0,6	1,5	10		25			10		0,6	30

Задача №2 (для четных вариантов).

К строительной площадке по воздушной линии электропередачи сопротивлением $R_{л}$ и $X_{л}$ подводится электрическая энергия от источника с напряжением U_c . На площадке установлено электрооборудование с напряжением питания $U_{п}$ (табл.3.3):

1. группа асинхронных двигателей – привод транспортеров;
2. группа асинхронных двигателей – привод кранов;
3. осветительные лампы.

Требования к контрольному заданию.

1. По условию задачи составить реальную схему электрической цепи.
2. На основе реальной схемы составить схему замещения (расчетную схему).
3. Вычислить необходимые параметры схемы замещения каждой группы потребителей и линии электропередачи. Построить треугольники сопротивлений.
4. Записать в комплексном виде сопротивления каждой группы потребителей и линии электропередачи.
5. Вычислить токи на всех участках цепи, напряжение в начале линии, а также активную, реактивную и полную мощность цепи и отдельных групп потребителей.
6. По результатам расчетов построить векторную диаграмму токов и напряжений для всей цепи.

7. Определить потерю напряжения и мощности в линии электропередачи.

8. Рассчитать емкость батареи конденсаторов, которую необходимо подключить параллельно электрооборудованию для поднятия его коэффициента мощности до 1.

9. Произвести проверку правильности расчетов составлением уравнения баланса полных мощностей для расчетной схемы.

Бланк задания для контрольной работы №2 приведен в приложении 2.

Таблица 3.3

Номер варианта	Uп, В	Линия передачи		Асинхронные двигатели				Асинхронные двигатели				Лампы R ₃ , Ом
		R _л , Ом	X _л , Ом	R ₁ , Ом	X ₁ , Ом	Z ₁ , Ом	cosφ ₁	R ₂ , Ом	X ₂ , Ом	Z ₂ , Ом	cosφ ₂	
1	220	0,4	0,8	6	10			7		12		10
2	220	0,8	1,6	10		16			15	20		15
3	220	0,8	2	8			0,6	5		10		20
4	220	0,8	1,2		10		0,9		7	15		8
5	220	0,8	0,8			30	0,75			16	0,6	20
6	220	2	0,8	12		20			30		0,75	12
7	220	2	0,8		4	16		25			0,75	16
8	220	2	1,2	8	16					26	0,8	20
9	220	1,2	2	12			0,7		22		0,85	14
10	220	1,5	2,5		15		0,8	20			0,75	10
11	220	1,5	2,5	8		14		20	10			8
12	220	2,5	1,5		10	16		20		30		12
13	220	1,5	2	6		12			15	20		14
14	380	0,8	1,2	12			0,6	20	15			20
15	380	0,8	1,6		16		0,75	15		30		25
16	380	0,8	2			20	0,6		18		0,6	20
17	380	2	1,6		16	25				20	0,7	18
18	380	2	1	14	18			15			0,9	14
19	380	1,5	0,8	15			0,75		18		0,85	18
20	380	0,8	1,8		18		0,6	15	18			24
21	380	0,5	1	10			0,5				0,5	10
22	380	0,6	1,2		10	20		10	15			12
23	380	0,7	1,5			25	0,8	18			0,7	15
24	380	1	0,8	8	12				20		0,8	20
25	380	1	1	6		25				15	0,6	25

3.5. Контрольная работа №3 по теме «Однофазные электрические цепи переменного тока»

Данная контрольная работа предусматривает решение пяти задач по всем разделам рассматриваемых тем. Примеры решения задач приведены в главе 2. Номера выдаваемых задач согласно вариантам приведены в табл. 3.4. Условия задач приведены в табл. 3.5.

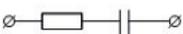
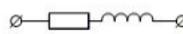
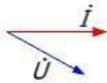
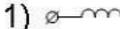
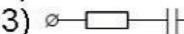
При выполнении работы переписывается условие задачи с указанием номера задачи из табл.3.5. Приводится ответ на поставленный вопрос с

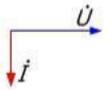
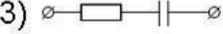
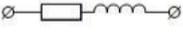
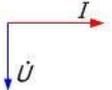
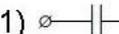
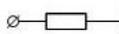
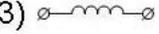
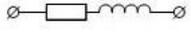
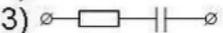
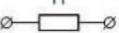
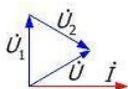
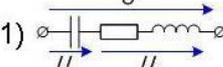
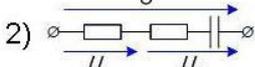
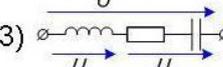
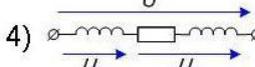
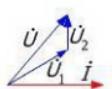
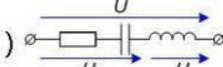
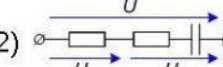
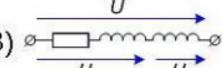
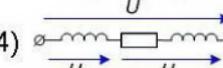
объяснением решения задачи. Приводится рисунок электрической схемы, векторная диаграмма или графики напряжения и тока, треугольники сопротивлений или мощностей. Титульный лист для оформления приведен в приложении 1, образец бланка задания – в приложении 2.

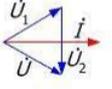
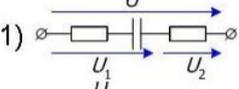
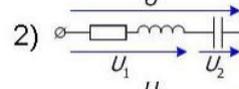
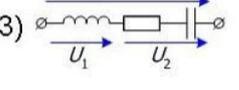
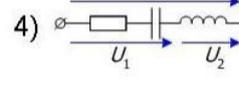
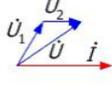
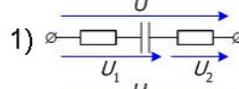
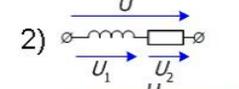
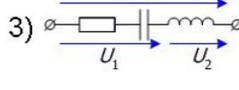
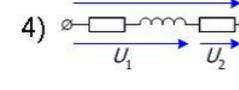
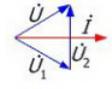
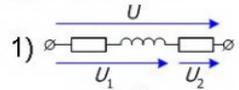
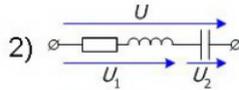
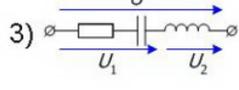
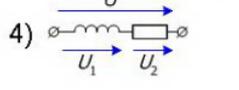
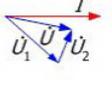
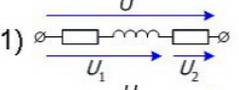
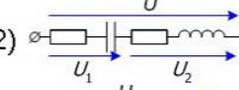
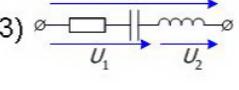
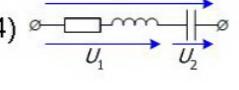
Таблица 3.4

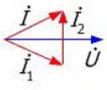
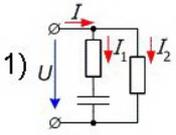
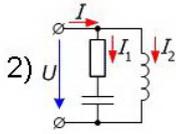
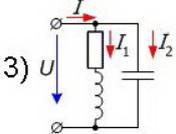
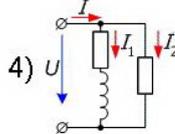
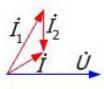
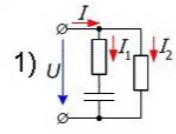
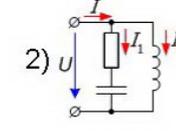
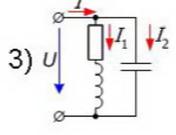
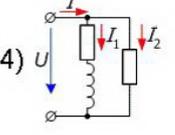
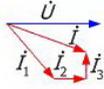
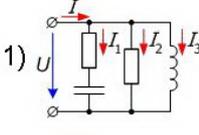
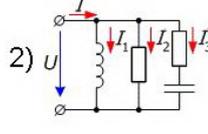
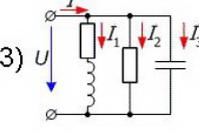
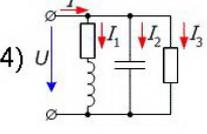
Номер варианта	Задачи					Номер варианта	Задачи				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1	1	18	37	77	109	14	14	32	54	91	149
2	2	19	38	78	108	15	15	33	55	98	150
3	3	20	39	79	103	16	16	34	56	76	152
4	4	21	40	80	102	17	17	35	57	75	147
5	5	22	41	81	116	18	6	24	36	74	112
6	6	23	42	82	117	19	7	21	38	86	146
7	7	24	43	83	127	20	12	30	49	79	150
8	8	25	48	84	128	21	4	27	53	80	127
9	9	26	49	85	141	22	8	33	55	91	141
10	10	27	50	86	142	23	3	20	37	81	148
11	11	28	51	87	145	24	13	32	39	90	103
12	12	29	52	89	146	25	9	19	40	85	102
13	13	30	53	90	148	26	10	25	42	82	116

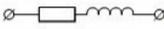
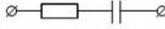
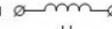
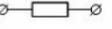
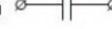
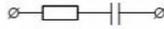
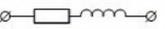
Таблица 3.5

№ п.п.	Задача
1	<p>1. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>
2	<p>2. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>

№ п.п.	Задача
3	<p>3. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>
4	<p>4. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>
5	<p>5. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>
6	<p>6. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>
7	<p>7. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>

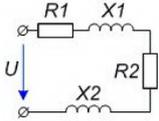
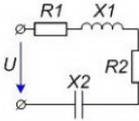
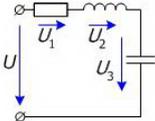
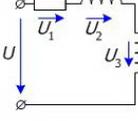
№ п.п.	Задача
8	<p>8. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>
9	<p>9. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>
10	<p>10. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>
11	<p>11. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>

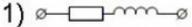
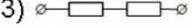
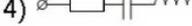
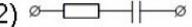
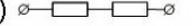
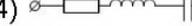
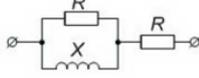
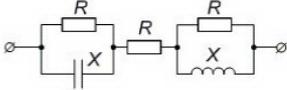
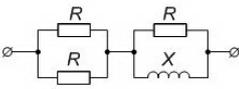
№ п.п.	Задача
12	<p>12. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1) </p> <p>2) </p> <p>3) </p> <p>4) </p>
13	<p>13. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1) </p> <p>2) </p> <p>3) </p> <p>4) </p>
14	<p>14. Для какой из приведенных схем справедлива векторная диаграмма?</p>  <p>1) </p> <p>2) </p> <p>3) </p> <p>4) </p>

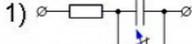
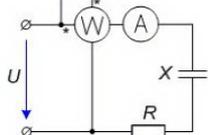
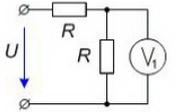
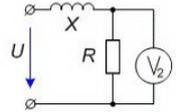
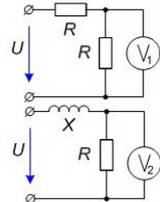
№ п.п.	Задача
28	<p>28. Задан закон изменения тока в цепи и приложенного напряжения: $i = I_m \sin(\omega t + 37^\circ)$, $u = U_m \sin(\omega t - 53^\circ)$ Указать схему замещения цепи.</p> <p>1)  2)  3)  4) </p>
29	<p>29. Задан закон изменения тока в цепи и приложенного напряжения: $i = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$, $u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$ Указать схему замещения цепи.</p> <p>1)  2)  3)  4) </p>
30	<p>30. Задан закон изменения тока в цепи и приложенного напряжения: $i = I_m \sin(\omega t - 45^\circ)$, $u = U_m \sin(\omega t - 90^\circ)$ Указать схему замещения цепи.</p> <p>1)  2)  3)  4) </p>
31	<p>31. Какие процессы в электротехническом устройстве характеризуют активное, индуктивное, емкостное и полное сопротивления его схемы замещения. Указать неверный ответ.</p> <p>1) Емкость характеризует переменное электрическое поле. 2) Активное сопротивление связано с преобразованием механической энергии в электрическую. 3) Индуктивное сопротивление связано с колебательным обменом энергией между магнитным полем устройства и сетью. 4) Полное сопротивление определяет величину потребляемого устройством тока.</p>

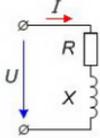
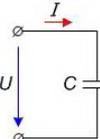
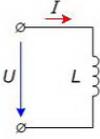
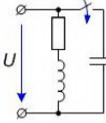
Продолжение таблицы 3.5

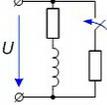
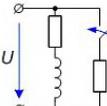
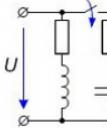
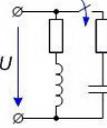
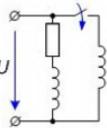
№ п.п.	Задача
32	<p>32. Указать ошибку в формулах при расчете цепи с последовательным соединением потребителей.</p> <p>1) $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ 2) $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ 3) $P = I^2 R$ 4) $U = U_1 + U_2$</p>
33	<p>33. Указать ошибку в формулах при расчете цепи с последовательным соединением потребителей.</p> <p>1) $S = UI$ 2) $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ 3) $S = S_1 + S_2$ 4) $S = I^2 Z$</p>
34	<p>34. Указать ошибку в формулах при расчете цепи с последовательным соединением потребителей.</p> <p>1) $P = UI \cos \varphi$ 2) $Z = R + X$ 3) $P = I^2 R$ 4) $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$</p>
35	<p>35. Указать ошибку в формулах при расчете цепи с последовательным соединением потребителей.</p> <p>1) $Q = UI \cos \varphi$ 2) $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ 3) $I = \frac{S}{U}$ 4) $P = I^2 R$</p>
36	<p>36. Вычислить полное сопротивление катушки при $\omega = 80 \text{ с}^{-1}$, имеющей $L = 0,1 \text{ Гн}$, $R = 6 \text{ Ом}$.</p> <p>1) 14 Ом 2) 10 Ом 3) 6 Ом 4) 2 Ом</p>
37	<p>37. Вычислить полное сопротивление цепи, содержащей последовательно включенные резистор и конденсатор, если $R = 10 \text{ Ом}$, $X = 17,3 \text{ Ом}$.</p> <p>1) 2,5 Ом 2) 7,3 Ом 3) 20 Ом 4) 27,3 Ом</p>

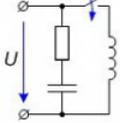
№ п.п.	Задача
38	<p>38. Вычислить полное сопротивление цепи, если $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}$, $X_1 = 5 \text{ Ом}$, $X_2 = 15 \text{ Ом}$.</p>  <p>1) 40 Ом 2) 30 Ом 3) 28,2 Ом 4) 22,2 Ом</p>
39	<p>39. Вычислить полное сопротивление цепи, если $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}$, $X_1 = 5 \text{ Ом}$, $X_2 = 15 \text{ Ом}$.</p>  <p>1) 40 Ом 2) 30 Ом 3) 28,2 Ом 4) 22,2 Ом</p>
40	<p>40. Даны напряжения на отдельных участках цепи:</p> <p>$U_1 = 40 \text{ В}$ $U_2 = 60 \text{ В}$ $U_3 = 30 \text{ В}$</p>  <p>Определить приложенное напряжение.</p> <p>1) 50 В 2) 70 В 3) 98 В 4) 130 В</p>
41	<p>41. Даны напряжения на отдельных участках цепи:</p> <p>$U_1 = 30 \text{ В}$ $U_2 = 40 \text{ В}$ $U_3 = 50 \text{ В}$</p>  <p>Определить напряжение U на зажимах источника.</p> <p>1) 120 В 2) 96 В 3) 40 В 4) 32 В</p>

№ п.п.	Задача
42	<p>42. Какая из цепей имеет наибольшее полное сопротивление, если $R = \chi_L = \chi_C$?</p> <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>
43	<p>43. Какая из цепей имеет наименьшее полное сопротивление, если $R = \chi_L = \chi_C$?</p> <p>1)  2) </p> <p>3)  4) </p>
44	<p>44. Найти полное сопротивление цепи, если $R = X = 5$ Ом.</p> <p></p> <p>1) $7,5 + j2,5$ Ом 2) $7,5$ Ом 3) $7,5 - j2,5$ Ом 4) $10 + j10$ Ом</p>
45	<p>45. Найти полное сопротивление цепи, если $R = X = 10$ Ом.</p> <p></p> <p>1) $20 + j20$ Ом 2) 20 Ом 3) $10 + j10$ Ом 4) $10 - j10$ Ом</p>
46	<p>46. Найти полное сопротивление цепи, если $R = X = 10$ Ом.</p> <p></p> <p>1) 10 Ом 2) 15 Ом 3) $10 + j5$ Ом 4) $5 + j10$ Ом</p>

№ п.п.	Задача
47	<p>47. Полное сопротивление какой схемы не изменится при размыкании ключа, если $R = X_L = X_C$?</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>1) </p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>2) </p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>3) </p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>4) </p> </div> </div>
48	<p>48. Определить величину сопротивления X, если $U = 200$ В, показание ваттметра $P_w = 640$ Вт, показание амперметра $I = 4$ А.</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;">  </div> <div> <p>1) 10 Ом 2) 20 Ом 3) 30 Ом 4) 40 Ом</p> </div> </div>
49	<p>49. Сравнить показания вольтметров, если $R = X$</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> <p>1) $U_1 = U_2$ 2) $U_1 < U_2$ 3) $U_1 > U_2$ 4) Для ответа недостаточно данных</p>
50	<p>50. Как изменятся показания вольтметров при увеличении частоты сети?</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;">  </div> <div> <p>1) U_2 уменьшится 2) U_1 уменьшится 3) U_1 увеличится 4) U_2 увеличится</p> </div> </div>

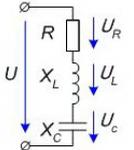
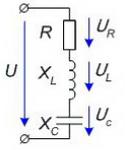
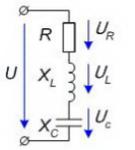
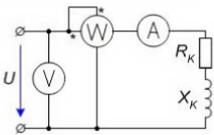
№ п.п.	Задача
51	<p>51. Определить активную мощность цепи, если $U = 200 \text{ В}$, $I = 4 \text{ А}$, $X = 30 \text{ Ом}$.</p>  <p>1) 320 Вт 2) 640 Вт 3) 480 Вт 4) 800 Вт</p>
52	<p>52. Как изменится ток в цепи при увеличении частоты питающего напряжения?</p>  <p>1) Не изменится 2) Уменьшится 3) Увеличится 4) Для ответа недостаточно данных</p>
53	<p>53. Как изменится ток в цепи при увеличении частоты питающего напряжения?</p>  <p>1) Для ответа недостаточно данных 2) Увеличится 3) Не изменится 4) Уменьшится</p>
54	<p>54. Как изменится активная мощность цепи при замыкании ключа?</p>  <p>1) Не изменится 2) Увеличится 3) Уменьшится 4) Для ответа недостаточно данных</p>

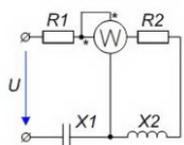
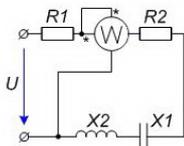
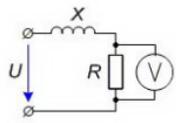
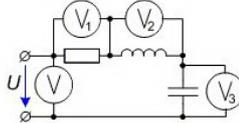
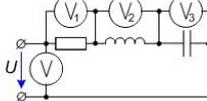
№ п.п.	Задача
55	<p>55. Как изменится активная мощность цепи при замыкании ключа?</p>  <p>1) Не изменится 2) Увеличится 3) Уменьшится 4) Для ответа недостаточно данных</p>
56	<p>56. Как изменится реактивная мощность цепи при замыкании ключа?</p>  <p>1) Увеличится 2) Уменьшится 3) Не изменится 4) Для ответа недостаточно данных</p>
57	<p>57. Как изменится активная мощность цепи при замыкании ключа?</p>  <p>1) Для ответа недостаточно данных 2) Не изменится 3) Уменьшится 4) Увеличится</p>
58	<p>58. Как изменится реактивная мощность цепи при замыкании ключа?</p>  <p>1) Для ответа недостаточно данных 2) Не изменится 3) Увеличится 4) Уменьшится</p>
59	<p>59. Как изменится реактивная мощность цепи при замыкании ключа?</p>  <p>1) Не изменится 2) Увеличится 3) Уменьшится 4) Для ответа недостаточно данных</p>

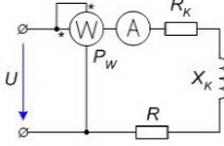
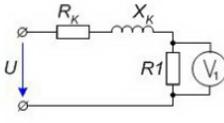
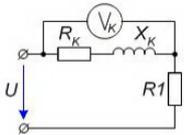
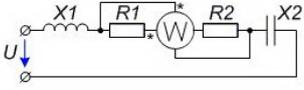
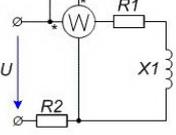
№ п.п.	Задача
60	<p>60. Как изменится активная мощность цепи при замыкании ключа?</p>  <p>1) Увеличится 2) Уменьшится 3) Не изменится 4) Для ответа недостаточно данных</p>
61	<p>61. Напряжение, приложенное к цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора, изменяется по закону $u = U_m \sin \omega t$. Указать закон изменения тока.</p> <p>1) $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$ 2) $i = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ 3) $i = I_m \sin(\omega t - \psi)$ 4) $i = I_m \sin \omega t$</p>
62	<p>62. Резистор и конденсатор соединены последовательно и подключены к источнику, напряжение которого изменяется по закону $u = 141 \sin(\omega t + 30^\circ)$, указать закон изменения тока, если $R = X = 10 \text{ Ом}$.</p> <p>1) $i = 7 \sin(\omega t - 15^\circ)$ 2) $i = 10 \sin(\omega t + 75^\circ)$ 3) $i = 10 \sin(\omega t - 15^\circ)$ 4) $i = 7 \sin(\omega t + 75^\circ)$</p>
63	<p>63. Индуктивная катушка подключена к источнику с напряжением, изменяющемся по закону $u = 50 \sin(\omega t - 20^\circ)$. Указать закон изменения тока, если $R_k = 8 \text{ Ом}$, $X_k = 6 \text{ Ом}$.</p> <p>1) $i = 3,57 \sin(\omega t - 20^\circ)$ 2) $i = 3,57 \sin(\omega t - 57^\circ)$ 3) $i = 5 \sin(\omega t - 57^\circ)$ 4) $i = 5 \sin(\omega t - 17^\circ)$</p>
64	<p>64. Индуктивная катушка подключена к источнику с напряжением, изменяющемся по закону $u = 30 \sin(\omega t + 40^\circ)$. Указать закон изменения тока, если $R_k = 8 \text{ Ом}$, $X_k = 6 \text{ Ом}$.</p> <p>1) $i = 2,14 \sin(\omega t + 93^\circ)$ 2) $i = 3 \sin(\omega t + 93^\circ)$ 3) $i = 2,14 \sin(\omega t - 13^\circ)$ 4) $i = 3 \sin(\omega t - 13^\circ)$</p>

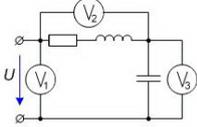
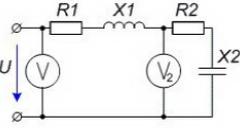
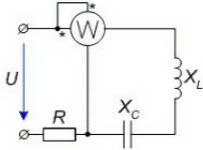
№ п.п.	Задача
65	<p>65. Резистор сопротивлением $R = 10$ Ом и конденсатор сопротивлением $X = 10$ Ом соединены последовательно. Указать закон изменения приложенного к цепи напряжения, если ток в ней изменяется по закону $i = 1,41 \sin(\omega t + 60^\circ)$.</p> <p>1) $u = 20 \sin(\omega t + 15^\circ)$ 2) $u = 20 \sin(\omega t + 105^\circ)$ 3) $u = 28,2 \sin(\omega t - 45^\circ)$ 4) $u = 28,2 \sin(\omega t + 15^\circ)$</p>
66	<p>66. Ток в цепи индуктивной катушки изменяется по закону $i = 5 \sin(\omega t + 30^\circ)$. Указать закон изменения приложенного напряжения, если $R_k = 5$ Ом, $X_k = 8,65$ Ом.</p> <p>1) $u = 50 \sin(\omega t - 30^\circ)$ 2) $u = 50 \sin(\omega t + 90^\circ)$ 3) $u = 68,25 \sin \omega t$ 4) $u = 68,25 \sin(\omega t - 30^\circ)$</p>
67	<p>67. Напряжение, приложенное к цепи, изменяется по закону $u = 100 \sin(\omega t + 60^\circ)$. Цепь состоит из соединенных последовательно резистора, индуктивности и конденсатора. Указать закон изменения тока в цепи, если $R = 10$ Ом, $X_L = 16$ Ом, $X_C = 6$ Ом.</p> <p>1) $2,5 \sin(\omega t + 105^\circ)$ 2) $3,1 \sin(\omega t + 15^\circ)$ 3) $4,1 \sin(\omega t + 60^\circ)$ 4) $5 \sqrt{2} \sin(\omega t + 15^\circ)$</p>
68	<p>68. Напряжение, приложенное к цепи, изменяется по закону $u = 50 \sin(\omega t - 20^\circ)$. Цепь состоит из соединенных последовательно резистора, индуктивности и емкости. Указать закон изменения тока в цепи, если $R = 8$ Ом, $X_L = 4$ Ом, $X_C = 10$ Ом.</p> <p>1) $i = 6,2 \sin(\omega t - 20^\circ)$ 2) $i = 5 \sin(\omega t + 17^\circ)$ 3) $i = 5 \sin(\omega t - 57^\circ)$ 4) $i = 6,2 \sin(\omega t + 37^\circ)$</p>

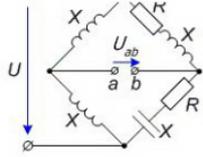
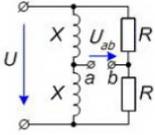
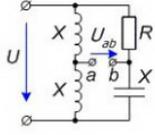
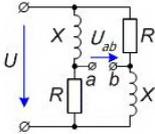
№ п.п.	Задача
69	<p>69. Напряжение, приложенное к цепи, изменяется по закону $u = 200 \sin(\omega t + 40^\circ)$. Цепь состоит из соединенных последовательно резистора, индуктивности и емкости. Указать закон изменения напряжения на резисторе, если $R = 6 \text{ Ом}$, $X_L = 8 \text{ Ом}$, $X_C = 16 \text{ Ом}$.</p> <p>1) $u_R = 120 \sin(\omega t + 40^\circ)$ 2) $u_R = 160 \sin(\omega t + 40^\circ)$ 3) $u_R = 120 \sin(\omega t + 93^\circ)$ 4) $u_R = 160 \sin(\omega t + 93^\circ)$</p>
70	<p>70. Напряжение, приложенное к цепи, изменяется по закону $u = 100 \sin(\omega t - 60^\circ)$. Цепь состоит из соединенных последовательно резистора, индуктивности и конденсатора. Указать закон изменения напряжения на конденсаторе, если $R = 6 \text{ Ом}$, $X_L = 8 \text{ Ом}$, $X_C = 16 \text{ Ом}$.</p> <p>1) $u_C = 160 \sin(\omega t - 97^\circ)$ 2) $u_C = 160 \sin(\omega t - 90^\circ)$ 3) $u_C = 80 \sin(\omega t + 27^\circ)$ 4) $u_C = 80 \sin(\omega t + 90^\circ)$</p>
71	<p>71. Напряжение, приложенное к цепи, изменяется по закону $u = 100 \sin(\omega t - 40^\circ)$. Цепь состоит из соединенных последовательно резистора, индуктивности и конденсатора. Указать закон изменения напряжения на индуктивности, если $R = 6 \text{ Ом}$, $X_L = 16 \text{ Ом}$, $X_C = 8 \text{ Ом}$.</p> <p>1) $u_L = 52,8 \sin(\omega t + 40^\circ)$ 2) $u_L = 52,8 \sin(\omega t - 120^\circ)$ 3) $u_L = 160 \sin(\omega t - 93^\circ)$ 4) $u_L = 160 \sin(\omega t - 3^\circ)$</p>
72	<p>72. Ток в цепи и приложенное к ней напряжение изменяются по законам: $i = 10 \sin(\omega t - 30^\circ)$, $u = 100 \sin(\omega t + 30^\circ)$. Определить потребляемую из сети активную мощность.</p>

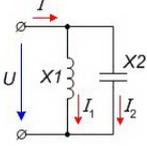
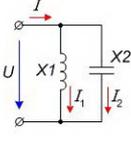
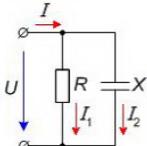
№ п.п.	Задача
73	<p>73. Ток в указанной цепи изменяется по закону $i = I_m \sin \omega t$. Какое из приведенных выражений несправедливо, если $X_L > X_C$?</p>  <ol style="list-style-type: none"> 1) $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ 2) $u_R = I_m R \sin \omega t$ 3) $u_L = I_m X_L \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ 4) $u_C = I_m X_C \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$
74	<p>74. Ток в указанной цепи изменяется по закону $i = I_m \sin \omega t$. Какое из приведенных выражений несправедливо, если $X_L < X_C$?</p>  <ol style="list-style-type: none"> 1) $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ 2) $u_R = I_m R \sin \omega t$ 3) $u_L = I_m X_L \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ 4) $u_C = I_m X_C \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$
75	<p>75. Ток в указанной цепи изменяется по закону $i = I_m \sin \omega t$. Какое из приведенных выражений несправедливо, если $X_L < X_C$?</p>  <ol style="list-style-type: none"> 1) $u_R = I_m R \sin \omega t$ 2) $u_C = I_m X_C \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ 3) $u = U_m \sin(\omega t - \varphi)$ 4) $u_R = I_m \sqrt{Z^2 - (X_L + X_C)^2} \sin \omega t$
76	<p>76. Определить X_K, если даны показания приборов: $U = 100$ В, $I = 10$ А, $P = 600$ Вт.</p> 

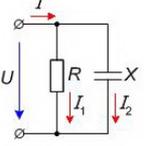
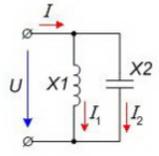
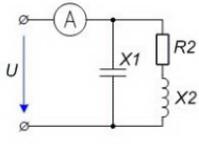
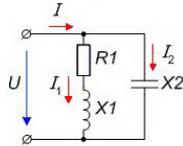
№ п.п.	Задача
77	<p>77. Определить показание ваттметра.</p>  <p>Дано: $U = 100 \text{ В}$ $R_2 = X_2 = 5 \text{ Ом}$ $R_1 = 3 \text{ Ом}$ $X_1 = 11 \text{ Ом}$</p>
78	<p>78. Определить показание ваттметра.</p>  <p>Дано: $U = 100 \text{ В}$ $X_1 = 6 \text{ Ом}$ $R_1 = R_2 = 2 \text{ Ом}$ $X_2 = 3 \text{ Ом}$</p>
79	<p>79. Определить показание вольтметра.</p>  <p>Дано: $U = 100 \text{ В}$ $R = 6 \text{ Ом}$ $X = 8 \text{ Ом}$</p>
80	<p>80. Найти показание вольтметра V_1, если даны показания остальных вольтметров: $U_{V_2} = 80 \text{ В}$, $U_{V_3} = 20 \text{ В}$, $U_V = 100 \text{ В}$.</p> 
81	<p>81. Найти показание вольтметра V_2, если даны показания остальных вольтметров: $U_V = U_{V_3} = 100 \text{ В}$, $U_{V_1} = 60 \text{ В}$.</p> 

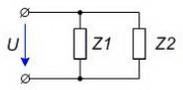
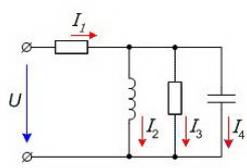
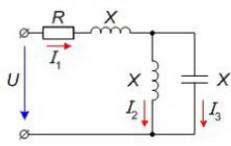
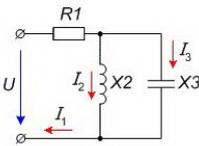
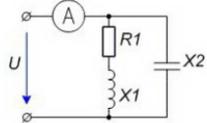
№ п.п.	Задача
82	<p>82. Определить полное сопротивление цепи, если дано: $I = 2 \text{ А}$, $P_w = 32 \text{ Вт}$, $X_k = 6 \text{ Ом}$.</p> 
83	<p>83. Дано: $U_1 = 20 \text{ В}$, $R_k = R_1 = 10 \text{ Ом}$. Определить потребляемую из сети активную мощность.</p> 
84	<p>84. Дано: $U = 141 \text{ В}$, $R_k = 6 \text{ Ом}$, $X_k = 8 \text{ Ом}$, $R_1 = 20 \text{ Ом}$. Определить показание вольтметра.</p> 
85	<p>85. Дано: $U = 100 \text{ В}$, $R_1 = R_2 = X_1 = X_2 = 5 \text{ Ом}$. Определить показание ваттметра.</p> 
86	<p>86. Дано: $U = 100 \text{ В}$, $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$, $X_1 = 6 \text{ Ом}$. Определить показание ваттметра.</p> 

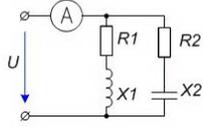
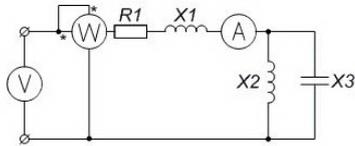
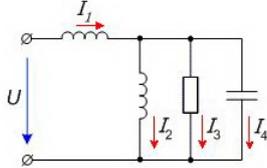
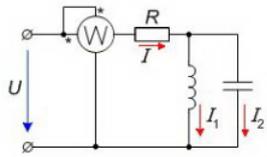
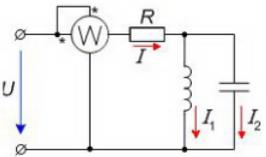
№ п.п.	Задача
87	<p>87. Дано: $I = 2 \text{ A}$, $U_{V1} = U_{V2} = 141 \text{ В}$, $U_{V3} = 200 \text{ В}$. Вычислить активную мощность цепи.</p> 
88	<p>88. Лампа мощностью 55 Вт с номинальным напряжением 110 В включается в сеть переменного тока с напряжением 220 В через дроссель (индуктивное сопротивление). Рассчитать индуктивность дросселя, приняв частоту сети $f = 50 \text{ Гц}$.</p>
89	<p>89. Определить показание вольтметра V. Дано: $R_1 = X_1 = R_2 = X_2$, $U_{V2} = 141 \text{ В}$.</p> 
90	<p>90. К источнику с напряжением $U = 100 \text{ В}$ подключены, соединенные последовательно, индуктивная катушка и конденсатор. Дано: $R_k = 6 \text{ Ом}$, $X_k = 8 \text{ Ом}$, $X_c = 16 \text{ Ом}$. Найти напряжение на катушке.</p>
91	<p>91. Определить показание ваттметра, если $R = X_L = 5 \text{ Ом}$, $X_C = 20 \text{ Ом}$, $U = 200 \text{ В}$.</p> 

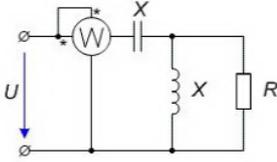
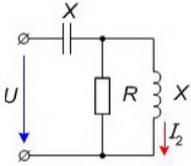
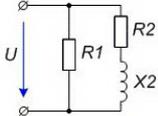
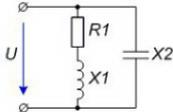
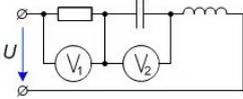
№ п.п.	Задача
92	<p>92. Определить напряжение U_{ab}, если $U = 100$ В, $R = X$</p> 
93	<p>93. Определить напряжение U_{ab}, если $U = 200$ В, $R = X$</p> 
94	<p>94. Определить напряжение U_{ab}, если $U = 120$ В, $R = X$</p> 
95	<p>95. Определить напряжение U_{ab}, если $U = 100$ В, $R = X$</p> 

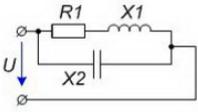
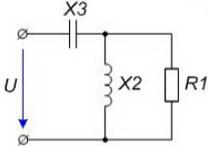
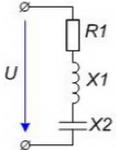
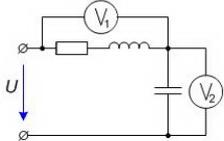
№ п.п.	Задача
96	<p>96. Дано:</p> <p>$X_1 = 10 \text{ Ом}$ $X_2 = 5 \text{ Ом}$ $i_1 = 5 \sin(\omega t - 20^\circ)$</p> <p>Указать закон изменения тока i_2 в цепи конденсатора</p>  <p>1) $i_2 = 5\sqrt{2} \sin(\omega t + 70^\circ)$ 2) $i_2 = 10 \sin(\omega t + 90^\circ)$ 3) $i_2 = 10 \sin(\omega t + 160^\circ)$ 4) $i_2 = 5 \sin(\omega t + 110^\circ)$</p>
97	<p>97. Дано:</p> <p>$X_1 = 20 \text{ Ом}$ $X_2 = 10 \text{ Ом}$ $i_2 = 10 \sin(\omega t + 150^\circ)$</p> <p>Указать закон изменения тока i_1 в цепи индуктивности</p>  <p>1) $i_1 = 20 \sin(\omega t + 60^\circ)$ 2) $i_1 = 5 \sin(\omega t + 30^\circ)$ 3) $i_1 = 20 \sin(\omega t + 30^\circ)$ 4) $i_1 = 5 \sin(\omega t - 30^\circ)$</p>
98	<p>98. Определить активное сопротивление цепи, если дан закон изменения тока и приложенного к цепи напряжения: $u = 50 \sin(\omega t + 20^\circ)$, $i = 2 \sin(\omega t + 80^\circ)$</p> <p>1) 12,5 Ом 2) 25 Ом 3) $25\sqrt{2}$ Ом 4) $25\sqrt{3}$ Ом</p>
99	<p>99. Ток I_2 в цепи изменяется по закону $i_2 = 10 \sin \omega t$. В каком из выражений допущена ошибка, если $R = X = 100 \text{ Ом}$?</p>  <p>1) $u = 1000 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ 2) $i_1 = 10 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ 3) $i = i_1 + i_2$ 4) $i = 10\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{3}{4}\pi)$</p>

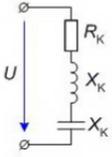
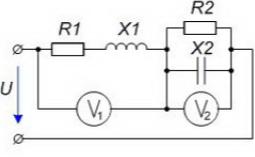
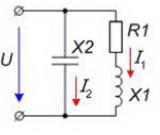
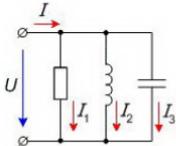
№ п.п.	Задача
100	<p>100. Ток I_2 в цепи изменяется по закону $i_2 = 5 \sin \omega t$. В каком из выражений допущена ошибка, если $R = X = 100 \text{ Ом}$?</p>  <p>1) $i = i_1 + i_2$ 2) $u = 500 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ 3) $i = 10 \sin(\omega t - \frac{\pi}{4})$ 4) $i_1 = 5 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$</p>
101	<p>101. Ток I_1 изменяется по закону $i_1 = 10 \sin \omega t$. В каком из выражений допущена ошибка, если $X_1 = 100 \text{ Ом}$, $X_2 = 50 \text{ Ом}$?</p>  <p>1) $u = 1000 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ 2) $i_2 = 20 \sin(\omega t + \pi)$ 3) $i = i_1 + i_2$ 4) $i = 30 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$</p>
102	<p>102. Найти показание амперметра. Дано: $U = 141 \text{ В}$, $R_2 = X_1 = X_2 = 5 \text{ Ом}$.</p> 
103	<p>103. Дано: $R_1 = 6 \text{ Ом}$, $X_1 = 8 \text{ Ом}$, $X_2 = 5 \text{ Ом}$, $I_1 = 1 \text{ А}$. Определить ток I_2.</p> 

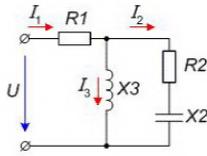
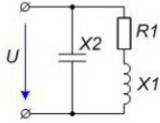
№ п.п.	Задача
104	<p>104. Дано: $U = 20$ В, $Z_1 = 6 + j8$ Ом, $Z_2 = 3 + j4$ Ом. Определить активную мощность цепи.</p> 
105	<p>105. Дано: $I_1 = 5$ А, $I_2 = 14$ А, $I_3 = 3$ А. Найти ток I_4.</p> 
106	<p>106. Дано: $I_2 = 10$ А, $R = X = 10$ Ом. Определить реактивную мощность цепи.</p> 
107	<p>107. Дано: $I_2 = 10$ А, $R_1 = 5$ Ом, $X_2 = 10$ Ом, $X_3 = 20$ Ом. Определить активную мощность цепи.</p> 
108	<p>108. При каком значении X_2 показание амперметра будет наименьшим, если $R_1 = 6$ Ом, $X_1 = 8$ Ом ?</p> 

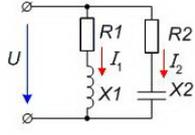
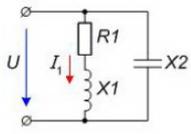
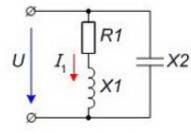
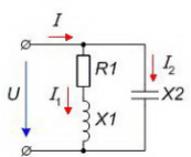
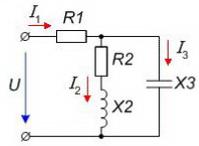
№ п.п.	Задача
109	<p>109. Определить показание амперметра. Дано: $U = 50$ В, $R_1 = X_2 = 6$ Ом, $R_2 = X_1 = 8$ Ом.</p> 
110	<p>110. Определить активное сопротивление R_1, если даны показания приборов: $U_V = 100$ В, $P_W = 80$ Вт, $I_A = 2$ А.</p> 
111	<p>111. Определить ток I_3, если $I_1 = I_2 = 10$ А, $I_4 = 4$ А.</p> 
112	<p>112. Определить показание ваттметра, если $R = 10$ Ом, $I_1 = 12$ А, $I_2 = 8$ А.</p> 
113	<p>113. Дано: $P_W = 180$ Вт; $R = 5$ Ом; $I_2 = 4$ А. Найти ток I_1</p> 

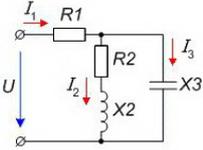
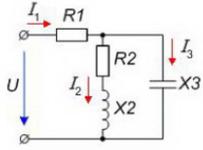
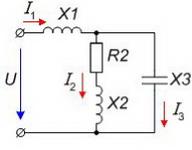
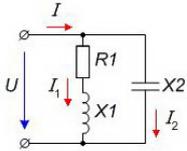
№ п.п.	Задача
114	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>114. Дано: $U = 200 \text{ В};$ $R = X = 200 \text{ Ом};$ Найти показание ваттметра.</p> </div> </div>
115	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <p>115. Дано: $R = X = 10 \text{ Ом};$ $I_2 = 2 \text{ А};$ Найти напряжение источника U.</p> </div> </div>
116	<p>116. Дано: $U = 100 \text{ В}, R_1 = 10 \text{ Ом}, R_2 = 6 \text{ Ом}, X_2 = 8 \text{ Ом}.$ Рассчитать активную мощность цепи.</p> <div style="text-align: center;">  </div>
117	<p>117. Дано: $U = 50 \text{ В}, R_1 = 3 \text{ Ом}, X_1 = 4 \text{ Ом}, X_2 = 10 \text{ Ом}.$ Рассчитать реактивную мощность цепи.</p> <div style="text-align: center;">  </div>
118	<p>118. В цепи имеет место резонанс напряжений. Даны показания вольтметров: $U_{V1} = 10 \text{ В}, U_{V2} = 40 \text{ В}.$ Найти напряжение U, приложенное к цепи.</p> <div style="text-align: center;">  </div>

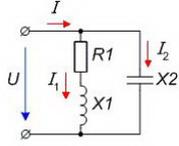
№ п.п.	Задача
119	<p>119. Дано: $R_1 = 300 \text{ Ом}$ $X_1 = 400 \text{ Ом}$</p>  <p>Определить сопротивление X_2, при котором в цепи будет резонанс токов.</p>
120	<p>120. Дано: $R_1 = 3 \text{ Ом}$ $X_2 = 4 \text{ Ом}$</p>  <p>Определить сопротивление X_3, при котором в цепи будет резонанс напряжений.</p>
121	<p>121. Определить напряжение источника, если в цепи имеет место резонанс напряжений. Дано: $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $X_1 = 10 \text{ Ом}$, $P_{\text{цепи}} = 1000 \text{ Вт}$.</p> 
122	<p>122. Цепь настроена в резонанс. Даны показания вольтметров: $U_{V1} = 100 \text{ В}$, $U_{V2} = 80 \text{ В}$. Определить приложенное напряжение U.</p> 

№ п.п.	Задача
123	<p>123. Цепь настроена в резонанс. Определить X_k, если $L_k = 0,01$ Гн, $C = 1$ мкФ.</p> 
124	<p>124. Катушка имеет сопротивление $200 + j200$ Ом. Какое емкостное сопротивление нужно подключить параллельно катушке, чтобы создать в цепи резонанс токов?</p>
125	<p>125. Дано: $X_1 = 100$ Ом, $R_1 = 173$ Ом, $U_{V1} = U_{V2}$. Схема настроена в резонанс. Найти сдвиг по фазе между напряжениями U_{V1} и U_{V2}.</p> 
126	<p>126. Дано: $Z_1 = 10 + j 10$ Ом $I_1 = 10$ А</p>  <p>Найти ток I_2, если в цепи установился резонанс токов.</p>
127	<p>127. Дано: $I_1 = I_2 = I_3 = 10$ А Найти потребляемый из сети ток I.</p> 

№ п.п.	Задача
128	<p>128. К сети с $U = 240$ В подключена установка, работающая с $\cos \varphi = 0,865$ при токе $I = 24$ А. Определить сопротивление конденсатора, который надо включить параллельно установке, для увеличения коэффициента мощности цепи до $\cos \varphi_{\text{цепи}} = 1$.</p>
129	<p>129. Параллельно индукционной печи, потребляющей мощность 12 кВт при коэффициенте мощности 0,6, подключена батарея конденсаторов мощностью 7 квар. Определить результирующий коэффициент мощности установки.</p>
130	<p>130. На сколько процентов уменьшится нагрузка трансформаторной подстанции, если за счет установки в цехе батареи конденсаторов поднять коэффициент мощности потребителей с 0,76 до 0,96?</p>
131	<p>131. Определить величину эквивалентного сопротивления цепи при резонансе токов, если $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 8$ Ом, $I_1 = 2$ А, $I_2 = 10$ А.</p> 
132	<p>132. Определить величину сопротивления X_2, при котором в цепи возникнет резонанс токов, если $R_1 = 8$ Ом, $X_1 = 6$ Ом.</p> 

№ п.п.	Задача
133	<p>133. Дано: $I_1 = 10 \text{ A}$, $I_2 = 5 \text{ A}$, $R_2 = 30 \text{ Ом}$, $X_2 = 40 \text{ Ом}$ В цепи-резонанс токов. Определить сопротивление X_1.</p> 
134	<p>134. Дано: $U = 150 \text{ В}$, $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $X_1 = 3 \text{ Ом}$. В цепи - резонанс. Найти ток I, потребляемый из сети.</p> 
135	<p>135. Дано: $U = 100 \text{ В}$, $X_2 = 10 \text{ Ом}$, $I_1 = 20 \text{ Ом}$. В цепи - резонанс. Найти величину сопротивления R_1.</p> 
136	<p>136. Дано: $I_1 = 10 \text{ A}$, $I_2 = 6 \text{ A}$. В цепи - резонанс. Найти ток I, потребляемый из сети.</p> 
137	<p>137. Дано: $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$, $I_2 = 10 \text{ A}$, $I_3 = 8 \text{ A}$. В цепи - резонанс. Вычислить активную мощность цепи.</p> 

№ п.п.	Задача
138	<p>138. Дано: $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $P_1 = 640 \text{ Вт}$, $I_2 = 10 \text{ А}$. В цепи - резонанс. Вычислить ток I_3.</p> 
139	<p>139. Дано: $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $P_1 = 45 \text{ Вт}$, $I_3 = 4 \text{ А}$. В цепи - резонанс. Вычислить ток I_2.</p> 
140	<p>140. Дано: $X_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 12 \text{ Ом}$, $Q_{\text{цепи}} = 180 \text{ вар}$, $P_{\text{цепи}} = 1200 \text{ Вт}$. В цепи - резонанс токов. Вычислить ток I_3.</p> 
141	<p>141. Дано: $U = 20 \text{ В}$, $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $X_1 = 3 \text{ Ом}$, $I = 4 \text{ А}$. Вычислить сопротивление X_2.</p> 

№ п.п.	Задача
142	<p>142. Дано: $U = 50$ В, $Z_1 = 10$ Ом, $X_1 = 5$ Ом, $X_2 = 10$ Ом. Вычислить потребляемый из сети ток I.</p> 
143	<p>143. В цепь переменного тока включены параллельно индуктивная катушка и конденсатор. Дано: $U = 120$ В, $Z_K = 12$ Ом, $\cos \varphi_K = 0,8$. В цепи - резонанс. Найти потребляемый из сети ток.</p>
144	<p>144. В цепь переменного тока включены параллельно индуктивная катушка и конденсатор. Дано: $U = 100$ В, $I_{\text{цепи}} = 10$ А, $\cos \varphi_{\text{цепи}} = 0,707$, $I_K = 9$ А. Вычислить сопротивление конденсатора.</p>
145	<p>145. В цепь переменного тока включены параллельно индуктивная катушка и конденсатор. Дано: $U = 200$ В, $P_{\text{цепи}} = 200$ Вт, $I_K = 2$ А, $X_C = 10$ Ом. Найти ток цепи.</p>
146	<p>146. В цепь переменного тока включены параллельно индуктивная катушка и конденсатор. Дано: $Z_K = 10$ Ом, $\cos \varphi_K = 0,6$, $I_K = 5$ А, $I_{\text{цепи}} = 5$ А. Вычислить сопротивление конденсатора.</p>
147	<p>147. Катушка и конденсатор включены параллельно в цепь переменного тока. Дано: $U = 100$ В, $I_{\text{цепи}} = 10$ А, $I_K = 15$ А, $\sin \varphi_K = 0,8$. Найти реактивную мощность цепи.</p>

Продолжение таблицы 3.5

№ п.п.	Задача
148	<p>148. В цепь переменного тока включены параллельно индуктивная катушка и реостат. Дано: $U = 200$ В, $R_K = 400$ Вт, $\cos\varphi_K = 0,5$, $R_{Rp} = 300$ Вт. Найти потребляемый из сети ток.</p>
149	<p>149. В цепь переменного тока включены параллельно индуктивная катушка и реостат. Дано: $U = 200$ В, $Q_K = 500$ вар, $R_K = 800$ Вт, $R_p = 20$ Ом. Найти потребляемый из сети ток.</p>
150	<p>150. В цепь переменного тока включены параллельно индуктивная катушка и реостат. Дано: $P_{цепи} = 800$ Вт, $R_K = 600$ Вт, $\cos\varphi_K = 0,6$, $R_p = 50$ Ом. Найти потребляемый из сети ток.</p>
152	<p>151. В цепь переменного тока включены параллельно индуктивная катушка и конденсатор. Данные токи: $I_K = 20$ А, 800 Вт, $I_C = 10$ А. В цепи резонанс. Определить ток в цепи источника.</p>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин, А.С. Электротехника: учебник / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М.: Академия, 2008. – 538 с.
2. Борисов, Ю.М. Электротехника./ Ю.М. Борисов, Д.Н. Липатов, Ю.Н. Зорин. – Минск: Высшая школа, 2007. – 542 с.
3. Электротехника: учеб. пособие: в 3 кн. / под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятулина, А.Л. Шестакова. – М.; Челябинск: Изд – во ЮУрГУ, 2003. – Кн.1. – 505 с.
4. Иванов, И.И. Электротехника: учебник для неэлектротехнических направлений и специальностей ВУЗов / И.И. Иванов, Г.И. Соловьёв, В.С. Равдоник. – СПб. и др.: Лань, 2006. – 495 с.
5. Коголь, И.М. Электротехника: учебное пособие к практическим занятиям. Электронное издание / И.М. Коголь, Г.П. Дубовицкий. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 108 с. (http://www.lib.susu.ac.ru/ftd?base=SUSU_METHOD&key=000419712&dtype=F&etype=.pdf).
6. Электротехника: Учебно-методический комплекс. / И.М. Коголь, Г.П. Дубовицкий, В.Н. Бородянко, В.С. Гун, Н.В. Клиначёв, В.В. Крымский, А.Я. Эргард, В.А. Яковлев; под редакцией Н.В. Клиначёва. – Offline версия 2.2 – Челябинск, 2008–<http://model.exponenta.ru/electro>.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Титульный лист для контрольных работ

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Теоретические основы электротехники»



КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Вариант № _____

Выполнил:
студент группы _____

_____ 201__ г.

Проверил:

« _____ » _____ 201__ г.

Челябинск
201__ г.

Бланки заданий для контрольных работ

Контрольная работа № 1
«Расчет однофазных цепей переменного тока»

Задача №1. К автоматической линии фасовки пищевых продуктов по параллельной схеме подводится электрическая энергия от источника переменного напряжения U_n . На линии установлено электрооборудование, технические параметры которого приведены в таблице 1:

1. группа асинхронных двигателей – привод транспортёров;
2. осветительные лампы;
3. батарея конденсаторов – для компенсации реактивной мощности асинхронных двигателей и повышения тем самым коэффициента мощности ($\cos \varphi$) всей энергоустановки.

Таблица 1.

Номер варианта	$U_n, В$	Асинхронные двигатели				Осветительные лампы	Емкость
		$R_1, Ом$	$X_1, Ом$	$Z_1, Ом$	$\cos \varphi_1$	$R_2, Ом$	$C_3, мкФ$

Требования к заданию

1. По условию задачи составить реальную схему электрической цепи.
2. На основе реальной схемы составить расчетную схему (схему замещения).
3. Вычислить неизвестные параметры группы асинхронных двигателей.
4. Вычислить сопротивление X_3 батареи конденсаторов.
5. Записать в комплексной форме сопротивления каждой группы потребителей.
6. Вычислить токи всех потребителей, приняв начальную фазу напряжения питания U_n за ноль. Записать все токи в комплексной форме.
7. Построить в масштабе векторную диаграмму напряжения U_n и всех токов. По первому закону Кирхгофа $\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3$ определить ток \underline{I} , потребляемый из сети.
8. Вычислить активную, реактивную и полную мощности каждой группы потребителей и всей энергоустановки.
9. Произвести проверку правильности расчётов по балансу полных мощностей.

Контрольная работа № 2

«Расчет сложной однофазной цепи»

Задача №1 (для нечетных вариантов).

К сварочному участку по кабельной линии электропередачи, имеющей сопротивления $R_{л}$ и $X_{л}$, подводится электрическая энергия от источника с напряжением U_c . На участке установлено электрооборудование с напряжением питания $U_{п}$ (табл. 1):

1. сварочные трансформаторы;
2. группа асинхронных двигателей – привод транспортеров;
3. нагревательные печи.

Таблица 1

Номер варианта	U _п , В	Линия передачи		Сварочные трансформаторы				Асинхронные двигатели				Нагре- вательные печи R ₃ , Ом
		R _л , Ом	X _л , Ом	R ₁ , Ом	X ₁ , Ом	Z ₁ , Ом	cosφ ₁	R ₂ , Ом	X ₂ , Ом	Z ₂ , Ом	cosφ ₂	

Задание.

1. По условию задачи составить реальную схему электрической цепи.
2. На основе реальной схемы составить схему замещения (расчетную схему).
3. Вычислить необходимые параметры схемы замещения каждой группы потребителей и линии электропередачи. Построить треугольники сопротивлений.
4. Записать в комплексном виде сопротивления каждой группы потребителей и линии электропередачи.
5. Вычислить токи на всех участках цепи, напряжение в начале линии, а также активную, реактивную и полную мощность цепи и отдельных групп потребителей.
6. По результатам расчетов построить векторную диаграмму токов и напряжений для всей цепи.
7. Определить потерю напряжения и мощности в линии электропередачи.
8. Рассчитать емкость батареи конденсаторов, которую необходимо подключить параллельно электрооборудованию для поднятия его коэффициента мощности до 1.
9. Произвести проверку правильности расчетов составлением уравнения баланса полных мощностей для расчетной схемы.

Контрольная работа № 2

«Расчет сложной однофазной цепи»

Задача №2 (для четных вариантов).

К строительной площадке по воздушной линии электропередачи сопротивлением $R_{л}$ и $X_{л}$ подводится электрическая энергия от источника с напряжением U_c . На площадке установлено электрооборудование с напряжением питания $U_{п}$ (табл. 2):

1. группа асинхронных двигателей – привод транспортеров;
2. группа асинхронных двигателей – привод кранов;
3. осветительные лампы.

Таблица 2

Номер варианта	U _п , В	Линия передачи		Асинхронные двигатели				Асинхронные двигатели				Лампы R ₃ , Ом
		R _л , Ом	X _л , Ом	R ₁ , Ом	X ₁ , Ом	Z ₁ , Ом	cosφ ₁	R ₂ , Ом	X ₂ , Ом	Z ₂ , Ом	cosφ ₂	

Задание.

1. По условию задачи составить реальную схему электрической цепи.
2. На основе реальной схемы составить схему замещения (расчетную схему).
3. Вычислить необходимые параметры схемы замещения каждой группы потребителей и линии электропередачи. Построить треугольники сопротивлений.
4. Записать в комплексном виде сопротивления каждой группы потребителей и линии электропередачи.
5. Вычислить токи на всех участках цепи, напряжение в начале линии, а также активную, реактивную и полную мощность цепи и отдельных групп потребителей.
6. По результатам расчетов построить векторную диаграмму токов и напряжений для всей цепи.
7. Определить потерю напряжения и мощности в линии электропередачи.
8. Рассчитать емкость батареи конденсаторов, которую необходимо подключить параллельно электрооборудованию для поднятия его коэффициента мощности до 1.
9. Произвести проверку правильности расчетов составлением уравнения баланса полных мощностей для расчетной схемы.

Контрольная работа № 3

«Однофазные электрические цепи переменного тока»

Требования к выполнению контрольного задания.

1. Полностью переписывается условие задачи из табл.3.5.
2. Приводятся ответ на поставленный вопрос с объяснением им решения задачи.
3. Приводится рисунок электрической схемы, векторная диаграмма, графики напряжения и тока, треугольники сопротивлений или мощностей.

Таблица 1

Номер варианта	Задачи			
	1	2	3	4

Задача №1.

Решение задачи №1.

Задача №2.

Решение задачи №2 .

Задача №3.

Решение задачи №3.

Задача №4.

Решение задачи №4

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Однофазные электрические цепи переменного тока.....	4
1.1. Параметры синусоидального тока и напряжения	4
1.2. Комплексный метод расчета электрической цепи синусоидального тока	6
1.3. Элементы электрической цепи синусоидального тока	7
1.4. Электрические цепи с элементами R, L и C	9
1.5. Электрические цепи с элементами $R_K L_K$ и RC	13
1.6. Электрическая цепь с последовательным соединением резистора R1, индуктивной катушки $R_K L_K$ и конденсатора C	17
1.7. Электрические цепи с параллельным соединением элементов	20
1.8. Повышение коэффициента мощности в электрической цепи..	27
Глава 2. Решение задач по цепям переменного тока	
2.1. Расчет цепей переменного тока с последовательным соединением элементов	29
2.2. Расчет сложных цепей переменного тока.....	33
Глава 3. Контрольные задания по электротехнике	
3.1. Указания к выполнению контрольных работ.....	42
3.2. Методические указания к выполнению контрольных работ....	42
3.3. Контрольная работа №1. Расчёт однофазных цепей переменного тока	45
3.4. Контрольная работа №2 Расчёт сложной однофазной цепи	47
3.5. Контрольная работа №3 по теме «Однофазные электрические цепи переменного тока»	49
Библиографический список.....	84

Приложения

Приложение 1. Титульный лист для контрольных работ.....	85
Приложение 2. Бланки заданий для контрольных работ.....	86