ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

З. В. Зайцева, Н. К. Логвинова,
В. В. Сергеев, Д. В. Шушпанов

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Часть 1

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Раздел 3

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

СПб ГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018

УДК 621.3.011.7(078.5)
ББК 32.88-01я73
З-17

Рецензенты:
доктор технических наук,
профессор кафедры электроники и схемотехники СПбГУТ
В. А. Филин,
доктор технических наук,
профессор кафедры теоретических основ электротехники
СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова-Ленина
Е. Б. Соловьева

*Утверждено редакционно-издательским советом СПбГУТ
в качестве учебного пособия*

Зайцева, З. В.

З-17 Теория электрических цепей. Часть 1. Контрольно-измерительные материалы. Раздел 3 : учебное пособие / З. В. Зайцева, Н. К. Логвинова, В. В. Сергеев, Д. В. Шушпанов ; СПбГУТ. – СПб., 2018. – 39 с.

Содержит теоретический материал в виде алгоритмов, формул, определений, тесты и методические указания по их выполнению, контрольные вопросы, литературу по дисциплинам «Теория электрических цепей. Часть 1», «Электротехника и электроника».

Предназначено для повышения эффективности дистанционного обучения с использованием виртуальной обучающей среды «Moodle», для организации самостоятельной работы студентов очной и вечерней форм обучения по направлениям 10.03.01 «Радиотехника», 10.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», 11.03.04 «Электроника и наноэлетроника», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика», 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 27.03.01 «Стандартизация и метрология», 27.03.04 «Управление в технических системах», а также при подготовке специалистов по специальности 11.05.04 «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи».

УДК 621.3.011.7(078.5)
ББК 32.88-01я73

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Предназначено для студентов, обучающихся по дисциплинам «Теория электрических цепей. Часть 1», «Электротехника и электроника» и подготовлено в соответствии с действующей программой.

Учебное пособие разработано в целях повышения эффективности дистанционного обучения с использованием виртуальной обучающей среды «Moodle».

Контрольно-измерительные материалы могут использоваться студентами очной и вечерней форм обучения для организации самостоятельной работы над указанными выше дисциплинами и углубленного их изучения. Для этого в университете обеспечен доступ студентов к обучающей среде «Moodle» в кафедральных компьютерных классах.

Учебное пособие дает возможность студенту в удобном для него формате времени и места проработать и усвоить теоретический материал, который позволит грамотно ответить на вопросы тестов в режиме контроля и получить лучшие результаты.

В данном пособии представлен раздел 3 первой части дисциплины ТЭЦ, в котором рассматривается режим гармонических колебаний в ЭЦ.

Раздел состоит из теоретической части, контрольно-измерительных материалов в форме тестов и контрольных вопросов.

Теоретический материал приведен в сжатой форме и частично для наглядности представлен таблицами, содержащими схемы, временные и векторные диаграммы, формулы расчета параметров и характеристик ЭЦ.

Для всех методов анализа ЭЦ приведены алгоритмы расчета цепей. Показаны примеры решения типовых задач, которые помогут студенту выполнить тестовые задания.

Контрольные тесты составлены из вопросов и ответов с учетом специфики раздела и содержат не только текстовый материал, но и схемы ЭЦ, формулы, временные, векторные диаграммы и графики.

На каждый вопрос теста даны 4 варианта ответа. Форма ответа – выборочная: а, б, в, г, однако правильным может быть не только один ответ, но и несколько. При этом на правильность конструируемого ответа не влияет порядок ввода букв, обозначающих правильные ответы.

Форма ответов различна:

– текстовый материал в виде определений, законов, теорем;

– формулы расчета параметров и характеристик ЭЦ;

– математические выражения законов, функций, уравнений;

– числовые значения искомых величин, которые должны быть получены в результате выполнения нескольких этапов решения задач;

– графики и диаграммы;

– схемы ЭЦ.

В разделе 3 даны 75 тестов.

Раздел заканчивается контрольными вопросами. При подготовке к ответам на них студент может оценить свой уровень знаний и степень подготовленности как к текущему, так и к итоговому контролю – теоретическому зачету.

При организации дистанционного обучения в институте непрерывного образования в целях более детального изучения учебного материала третий раздел дисциплины разбит на шесть подразделов.

При работе в виртуальной обучающей среде «Moodle» в режиме обучения студент может выбрать любой раздел (подраздел) в соответствии с рабочей программой, представленной на сайте университета. В программе имеется тренировочный режим сдачи тестов, где не выставляется итоговая оценка, но показываются результаты ответов на каждый тест с демонстрацией правильного ответа. При такой форме работы с программой имеются ограничения на количество попыток студента.

Данное учебное пособие позволит студенту детально проработать учебный материал без каких-либо временных ограничений, проверить свои знания на компьютере в режиме обучения и, получив хорошие результаты, перейти в режим контроля.

3. АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Гармонические напряжения и токи. Символическое изображение косинусоидальных функций комплексными числами. Законы Кирхгофа в комплексной форме. Закон Ома в комплексной форме. Комплексные сопротивления и проводимости. Символический метод анализа гармонических колебаний. Применение символического метода для расчета мощности. Уравнение баланса средней мощности. Условие получения в нагрузке максимальной средней мощности. Цепи с взаимными индуктивностями. Особенности составления уравнений для цепей с магнитными связями. Трансформатор с воздушным сердечником. Уравнение трансформатора. Т-образная схема замещения трансформатора.

3.1. Гармонические напряжения и токи

Гармонические колебания тока и напряжения могут быть описаны одной из функций:

$$i(t)=I_m\cdot\cos(\omega t+\psi_i);\quad u(t)=U_m\cdot\cos(\omega t+\psi_u);$$

$$i(t)=I_m\cdot\sin(\omega t+\Theta_i);\quad u(t)=U_m\cdot\sin(\omega t+\Theta_u).$$

Обе записи равноправны, однако при решении задач следует придерживаться какой-либо одной из них. Мы будем пользоваться первой.

Наибольшее по абсолютному значению отклонение колеблющейся величины называется ее амплитудой и обозначается I_m (U_m). Наименьшее значение времени, после которого процесс полностью повторяется (время одного цикла колебания), называется периодом колебания T (рис. 3.1). Число циклов колебания в единицу времени называется циклической частотой колебания f или просто частотой. Частота измеряется в герцах (Гц). Герц – одно колебание в секунду. Число циклов колебания в интервале, равном 2π единицам времени, называется угловой частотой ω:

$$\omega=2\pi f=\frac{2\pi}{T}.$$

Величина $(\omega t+\psi)$ называется фазой колебания. Значение фазы колебания в момент времени $t=0$ называется начальной фазой колебания ψ.

Действующим значением любого периодического тока (напряжения) называется его среднеквадратичное значение за период T:

$$I=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2dt};\quad U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2dt}\,.$$

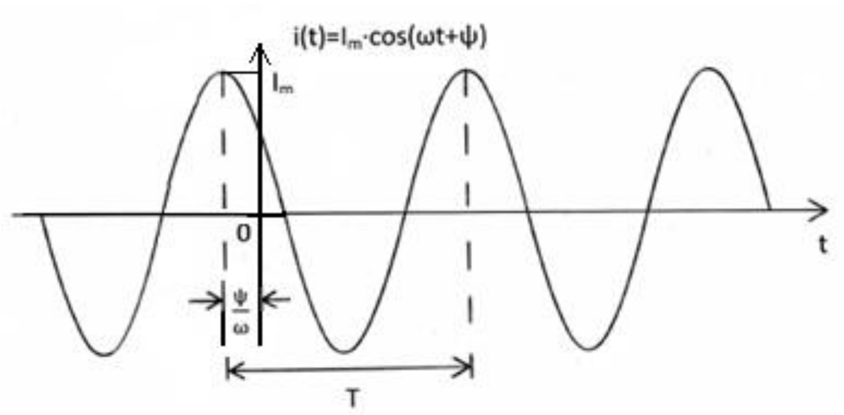


Рис. 3.1

Действующие значения гармонического тока (напряжения) в $\sqrt{2}$ раз меньше его амплитуды, т. е.

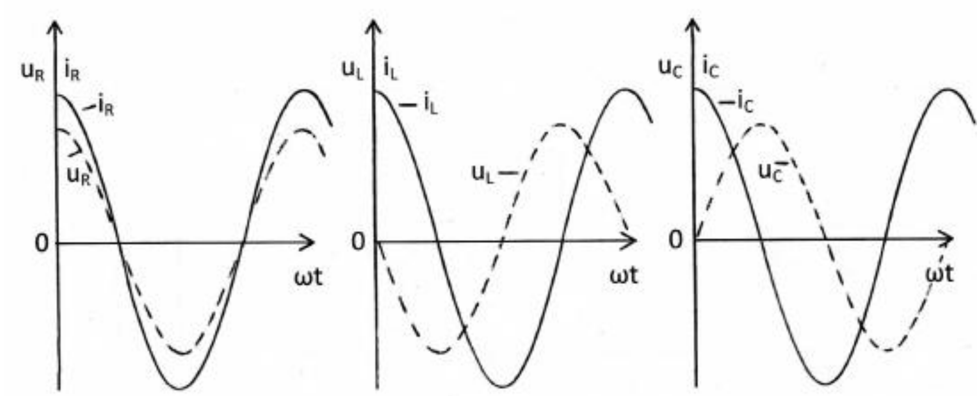
$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}\ ; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Измерительные приборы теплового действия показывают действующие значения токов и напряжений.

Амплитуды гармонического напряжения и тока на пассивных элементах линейной электрической цепи связаны прямой пропорциональной зависимостью следующего вида:

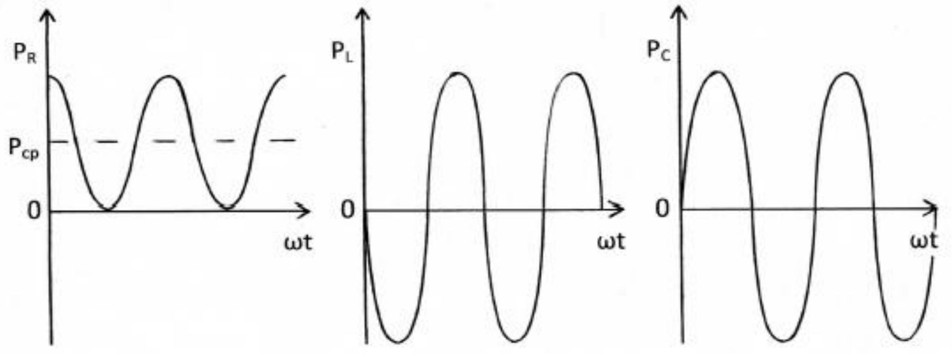
$$U_{mR} = R \cdot I_{mR};\ U_{mL} = \omega L \cdot I_{mL};\ U_{mC} = \frac{1}{\omega C} \cdot I_{mC}.$$

На резистивном сопротивлении ток и напряжение совпадают по фазе (рис. 3.2, *а*). Гармонические колебания тока в индуктивности отстают по фазе от колебаний напряжения на угол π/2 (рис. 3.2, *б*), а колебания тока в емкости опережают колебания напряжения на угол π/2 (рис. 3.2, *в*).



а) б) в)

Рис. 3.2



а) б) в)

Рис. 3.3

Если мгновенное значение тока в цепи с резистивным сопротивлением, индуктивностью или емкостью изменяется по закону $i(t) = I_m \cdot \cos(\omega t + \psi)$, то напряжения на этих элементах будут следующими:

$$u_R(t) = I_{mR} \cdot R \cdot \cos(\omega t + \psi);$$

$$u_L(t) = L\frac{di_L}{dt} = -I_{mL} \cdot \omega L \cdot \sin(\omega t + \psi) = I_{mL} \cdot \omega L \cdot \cos\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$u_C(t) = \frac{1}{C}\int i_c dt = I_{mC} \cdot \frac{1}{\omega C} \cdot \sin(\omega t + \psi) = I_{mC} \cdot \frac{1}{\omega C} \cdot \cos(\omega t + \psi - \pi/2).$$

Мгновенная мощность гармонических колебаний в общем случае, когда ток и напряжение сдвинуты по фазе на некоторый угол $\varphi = \psi_u - \psi_i$, определяется по формуле

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m \cdot \cos(\omega t + \psi_u) \cdot I_m \cdot \cos(\omega t + \psi_i) =$$
$$= U \cdot I \cdot \cos(\varphi) + U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i).$$

Средняя мощность

$$P = P_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(\varphi) = U \cdot I \cdot \cos(\varphi).$$

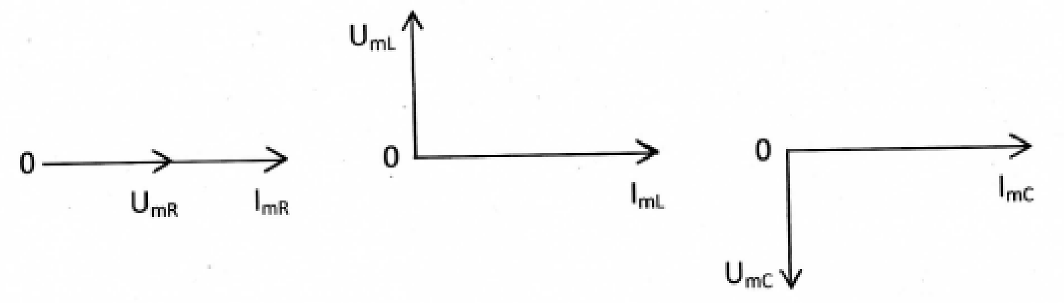
Угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i$ между гармоническим напряжением и током на зажимах любой цепи не зависит от начала отсчета времени и может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Если цепь является пассивной, то средняя мощность не может принимать отрицательных значений $P_{ср} \geq 0$, поэтому разность фаз φ не может выходить за пределы

$$-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}.$$

Для резистивного сопротивления $\varphi = 0$ и $P_{ср} = U_R \cdot I_R = I_R^2 \cdot R$, для индуктивности $\varphi = \pi/2$ и $P_{ср} = 0$, для емкости $\varphi = -\pi/2$ и $P_{ср} = 0$. Это говорит о том, что резистивное сопротивление непрерывно потребляет энергию и необратимо преобразует ее в другие виды энергии, тогда как реактивные элементы часть периода накапливают энергию, а часть – отдают обратно в цепь. На рис. 3.3, *а–в* приведены временные диаграммы мгновенных мощностей. Когда мгновенная мощность положительна, элемент цепи потребляет энергию (накапливает ее или рассеивает), когда отрицательна – возвращает запасенную энергию во внешнюю цепь.

Гармонические колебания равных частот в одной и той же цепи изображают на плоскости в виде векторной диаграммы. На ней в полярной системе координат каждому колебанию соответствует радиус-вектор, длина которого в выбранном масштабе пропорциональна амплитуде колебания, а полярный угол равен начальной фазе колебания.

На рис. 3.4, *а–в* приведены векторные диаграммы, соответствующие временным диаграммам гармонических колебаний на резистивном сопротивлении, индуктивности и емкости, представленным на рис. 3.2.



а) б) в)

Рис. 3.4

3.2. Символическое изображение косинусоидальных функций комплексными числами. Законы Кирхгофа в комплексной форме

Каждой косинусоидальной функции заданной частоты ω можно сопоставить вектор на комплексной плоскости. С другой стороны, каждый вектор можно записать в виде комплексного числа. Так, гармоническому колебанию, описываемому функцией $u(t) = U_m \cdot \cos(\omega t + \psi)$, можно сопоставить радиус-вектор $\dot{U}_m$ на комплексной плоскости (рис. 3.5).

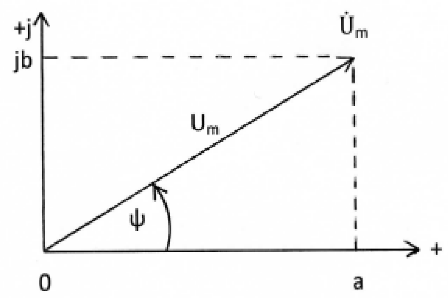


Рис. 3.5

Длина вектора в выбранном масштабе равна амплитуде колебания U_m, а угол, образованный этим вектором с положительным направлением вещественной оси, – начальной фазе колебания ψ. Этому вектору соответствует комплексное число

$$\dot{U}_m = U_m \cdot e^{j\psi} = U_m \cdot (\cos\psi + j\sin\psi) = U_m\cos\psi + j\,U_m\sin\psi = a + jb,$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; – вещественная часть; b – мнимая часть.

Модуль комплексного числа равен длине вектора

$$|\dot{U}_m| = U_m = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Аргумент комплексного числа равен углу между вектором и осью абсцисс:

$$\psi = \arg[\dot{U}_m] = \arg(a + jb) = \operatorname{arctg}\frac{b}{a} + k\cdot\pi,$$

где $\operatorname{arctg}\frac{b}{a}$ соответствует главному значению функции, ограниченной интервалом $-\frac{\pi}{2} < \operatorname{arctg}\frac{b}{a} < \frac{\pi}{2}$, ($k = 0$) а значение целого числа $k = 1$ принимается с учетом знаков составляющих a и b комплексного числа. В зависимости от знаков чисел a и b комплексное число $c = a + jb$ может изображаться точкой в любом из квадрантов комплексной плоскости.

Для перехода от показательной формы записи комплексного числа $c = |c|\cdot e^{j\psi}$ к алгебраической $c = a + jb$ используется формула Эйлера

$$e^{j\psi} = \cos\psi + j\sin\psi.$$

Тогда $c = |c|\cdot\cos\psi + j|c|\cdot\sin\psi$, и поэтому вещественная часть комплексного числа $a = Re\,(a + jb) = |c|\cdot\cos\psi$ и мнимая часть $b = Im\,(a + jb) = |c|\cdot\sin\psi$.

Имеют место соотношения: $j = e^{j90°}$, $j^2 = -1 = e^{j180°}$, $j^3 = -j = e^{-j90°}$, $j^4 = 1$.

Два комплексных числа c и c^* считаются сопряженными, если они отличаются лишь знаками их мнимых частей, т. е. если $c = a + jb$, то $c^* = a - jb$, либо для показательной формы записи комплексного числа, если $c = |c|\cdot e^{j\psi}$, то $c^* = |c|\cdot e^{-j\psi}$.

При вычислениях с комплексными числами важно знать:

$$c_1\cdot c_2 = (a_1 + jb_1)\cdot(a_2 + jb_2) = a_1\cdot a_2 - b_1\cdot b_2 + j(a_1\cdot b_2 + a_2\cdot b_1);$$

$$c\cdot c^* = (a + jb)\cdot(a - jb) = a^2 + b^2 = |c|^2;$$

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{a_1 + jb_1}{a_2 + jb_2} = \frac{(a_1 + jb_1)\cdot(a_2 - jb_2)}{(a_2 + jb_2)\cdot(a_2 - jb_2)} = \frac{a_1\cdot a_2 + b_1\cdot b_2}{a_2^2 + b_2^2} + j\,\frac{a_2\cdot b_1 - a_1\cdot b_2}{a_2^2 + b_2^2};$$

$$c_1 \pm c_2 = a_1 \pm a_2 + j(b_1 \pm b_2).$$

Комплексное число ($\dot{U}_m = U_m e^{j\varphi_u}$, $\dot{I}_m = I_m e^{j\varphi_i}$), модуль которого равен амплитуде, а аргумент – начальной фазе функции, описывающей гармоническое колебание, будем называть комплексной амплитудой колебания (напряжения, тока). Между комплексной амплитудой и гармоническим колебанием существует взаимно однозначное соответствие, которое математически выражается следующими зависимостями:

$$\dot{U}_m = \frac{2}{T}\int_0^T u(t)e^{-j\omega t}\,dt; \quad u(t) = Re\,(\dot{U}_m \cdot e^{j\omega t}).$$

Комплексные действующие значения отличаются от комплексных амплитуд в $\sqrt{2}$ раз: $\dot{U} = \dot{U}_m / \sqrt{2}$, $\dot{U}_m = \dot{U} \cdot \sqrt{2}$.

Для комплексных амплитуд напряжений и токов сохраняется та же система положительных направлений, которая была принята для мгновенных значений колебаний.

Комплексные амплитуды токов и напряжений в электрической цепи удовлетворяют законам Кирхгофа.

Для первого закона Кирхгофа, заменив мгновенные значения токов их комплексными амплитудами, получим

$$\sum_{k=1}^{n} \alpha_k \dot{I}_{mk} = 0,$$

где n – число ветвей, сходящихся в узле; $\alpha_k = \pm 1$.

Для второго закона Кирхгофа, заменив мгновенные значения напряжений их комплексными амплитудами, получим

$$\sum_{k=1}^{m} \beta_k \dot{U}_{mk} = 0,$$

где m – число ветвей, входящих в контур; $\beta_k = \pm 1$.

Примеры

1. По заданному мгновенному значению тока $i(t)$, А, записать комплексную амплитуду тока $\dot{I}_m$ и комплексное действующее значение тока $\dot{I}$:

$$i(t) = 0{,}2 \cdot \cos\left(10^6 t - 54°\right).$$

Решение

В соответствии с заданным мгновенным значением тока имеем:

– комплексная амплитуда тока, А: $\dot{I}_m = 0{,}2 \cdot e^{-j54°}$;

– комплексное действующее значение тока, А: $\dot{I} = \dfrac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = \dfrac{0{,}2}{\sqrt{2}} \cdot e^{-j54°}$.

2. Записать мгновенное значение гармонического напряжения по заданному комплексному действующему значению:

$$\dot{U} = -3 + j4.$$

Решение

От заданного комплексного действующего значения напряжения $\dot{U}$, В, в алгебраической форме перейдем к комплексной амплитуде в показательной форме:

$$\dot{U}_m = \dot{U} \cdot \sqrt{2} = \sqrt{2} \cdot (-3+j4) = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3^2+4^2} \cdot e^{j[\mathrm{arctg}(-4/3)+\pi]} =$$
$$= \sqrt{2} \cdot 5 \cdot e^{j(180°-53{,}13°)} = 7{,}071 \cdot e^{j126{,}87°}.$$

От комплексной амплитуды в показательной форме перейдем к мгновенному значению напряжения $u(t)$, В:

$$u(t) = \mathrm{Re}(\dot{U}m \cdot e^{j\omega t}) = \mathrm{Re}(7{,}071 \cdot e^{j126{,}87°} \cdot e^{j\omega t}) = 7{,}071 \cdot \cos(\omega t + 126{,}87°).$$

3.3. Закон Ома в комплексной форме. Комплексные сопротивления и проводимости. Символический метод анализа гармонических колебаний

Комплексные амплитуды напряжения и тока на входе двухполюсника (рис. 3.6) формально удовлетворяют закону Ома:

$$\dot{U}_m = Z(j\omega) \cdot \dot{I}_m; \quad \dot{I}_m = Y(j\omega) \cdot \dot{U}_m,$$

где $Z(j\omega) = R + jX = |Z(j\omega)| \cdot e^{j\varphi_Z}$ – комплексное сопротивление цепи;

$Y(j\omega) = \frac{1}{Z(j\omega)} = G + jB = |Y(j\omega)| \cdot e^{j\varphi_Y}$ – комплексная проводимость цепи.

В этих выражениях:

$$R = |Z(j\omega)| \cdot \cos(\varphi_Z) = \mathrm{Re}\, Z(j\omega);$$
$$X = |Z(j\omega)| \cdot \sin(\varphi_Z) = \mathrm{Im}\, Z(j\omega);$$
$$G = |Y(j\omega)| \cdot \cos(\varphi_Y) = \mathrm{Re}\, Y(j\omega);$$
$$B = |Y(j\omega)| \cdot \sin(\varphi_Y) = \mathrm{Im}\, Y(j\omega).$$

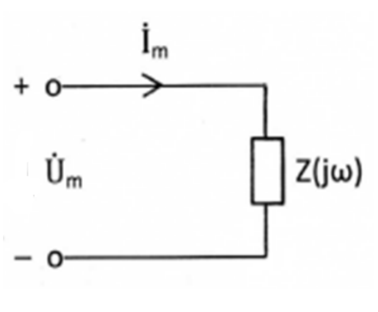


Рис. 3.6

Вещественные части этих представлений, т. е. R и G, называют резистивными составляющими соответственно сопротивления и проводимости двухполюсника, они принимают всегда положительные значения, так как cos x – четная функция. Коэффициенты при мнимых частях, т. е. X и B, называют реактивными составляющими соответственно сопротивления и проводимости двухполюсника, они могут принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от знака $\varphi_Z(\varphi_Y)$.

Запишем комплексное сопротивление (проводимость) через комплексные амплитуды напряжения и тока на входе двухполюсника (рис. 3.6):

$$Z(j\omega) = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{U_m \cdot e^{j\psi_u}}{I_m \cdot e^{j\psi_i}} = \frac{U_m}{I_m} \cdot e^{j(\psi_u - \psi_i)};$$

$$|Z(j\omega)| = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \varphi_Z = \psi_u - \psi_i = -\varphi_Y.$$

$$Y(j\omega) = \frac{\dot{I}_m}{\dot{U}_m} = \frac{I_m \cdot e^{j\psi_i}}{U_m \cdot e^{j\psi_u}} = \frac{I_m}{U_m} \cdot e^{j(\psi_i - \psi_u)};$$

$$|Y(j\omega)| = \frac{I_m}{U_m} = \sqrt{G^2 + B^2}; \quad \varphi_Y = \psi_i - \psi_u = -\varphi_Z.$$

Модуль комплексного сопротивления равен отношению амплитуды напряжения на внешних зажимах двухполюсника к амплитуде тока, который проходит через эти зажимы, или, что то же, отношение действующих значений этих колебаний. Обратное отношение характеризует модуль комплексной проводимости двухполюсника. Аргумент комплексного сопротивления равен разности фаз колебаний напряжения и тока на внешних зажимах двухполюсника и отличается знаком «минус» от аргумента комплексной проводимости двухполюсника. У пассивных двухполюсников значения аргументов

$$-\frac{\pi}{2} \le \varphi_Z \le \frac{\pi}{2} \text{ и } -\frac{\pi}{2} \le \varphi_Y \le \frac{\pi}{2}.$$

Комплексные сопротивления индуктивности, резистивного сопротивления и емкости соответственно равны

$$Z_L(j\omega) = j\omega L; \; Z_R(j\omega) = R; \; Z_C(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}.$$

Комплексные проводимости есть обратные им величины:

$$Y_L(j\omega) = \frac{1}{j\omega L} = \frac{-j}{\omega L}; \; Y_R(j\omega) = \frac{1}{R}; \; Y_C(j\omega) = j\omega C.$$

Анализ цепи символическим методом производится в следующем порядке.

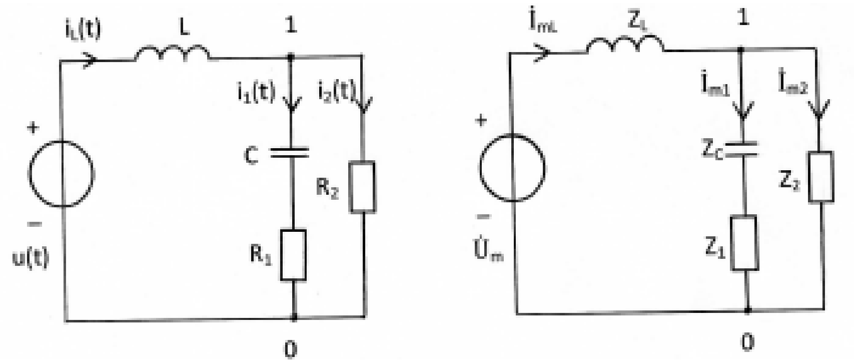
1. Переходим к комплексной схеме замещения цепи. Заданные гармонические колебания воздействий заменяются их комплексными амплитудами и вычисляются комплексные сопротивления элементов цепи. На схеме анализируемой цепи помечаются комплексные амплитуды колебаний искомых токов и напряжений.

2. Определяем неизвестные комплексные токи и напряжения. Составляется и решается система алгебраических уравнений для комплексных амплитуд колебаний, для чего можно использовать любой метод анализа цепей (метод эквивалентных преобразований цепи, метод наложения, метод узловых напряжений, метод контурных токов, метод эквивалентного генератора).

3. Осуществляем переход от найденных комплексных амплитуд к их мгновенным значениям.

Пример

Для цепи, схема которой приведена на рис. 3.7, *а*, рассчитать все токи и напряжения, записать их мгновенные значения, вычислить действующие значения, если $u(t) = 20 \cdot \cos(10^5 \cdot t)$ В; $L = 0{,}4$ мГн; $C = 0{,}25$ *мк*Ф; $R_1 = 40$ Ом; $R_2 = 80$ Ом.



а) б)

Рис. 3.7

Решение

Применим символический метод. Зададимся положительными направлениями токов в цепи и покажем их стрелками на рис. 3.7. Отметим узлы 0, 1.

1. Переходим к комплексной схеме замещения цепи (рис. 3.7, *б*). Определим параметры цепи:

$$\dot{U}_m = U_m \cdot e^{j\psi u} = 20 \text{ В}; \quad \psi_u = 0;$$

$$Z_L = j\omega L = j \cdot 10^5 \cdot 0{,}4 \cdot 10^{-3} = j40 = 40 \cdot e^{j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C} = -j40 = 40 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_1 = R_1 = 40 \text{ Ом}; \quad Z_2 = R_2 = 80 \text{ Ом}.$$

2. Определяем неизвестные комплексные токи и напряжения линейной цепи с одним независимым источником напряжения путем эквивалентных преобразований схемы заданной цепи.

Последовательное соединение элементов Z_1 и Z_C заменим эквивалентным $Z_{э1}$:

$$Z_{Э1} = Z_1 + Z_C = 40 - j40 =$$
$$= 40 \cdot (1 - j) = 40 \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-j\,\mathrm{arctg}(1)} = 56{,}57 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ Ом}.$$

Параллельное соединение элементов Z_2 и $Z_{э1}$ заменим эквивалентным $Z_{э2}$:

$$Z_{э2} = Z_2 \cdot Z_{э1}/(Z_2 + Z_{э1}) = 80 \cdot 40 \cdot (1 - j)/(120 - j40) = 16 \cdot (2 - j) =$$
$$= 16 \cdot \sqrt{5} \cdot e^{-j26,57°} \text{ Ом.}$$

Вычислим комплексную амплитуду тока $\dot{I}_{mL}$:

$$\dot{I}_{mL} = \dot{U}_m / (Z_L + Z_{э2}) = 20 / (32 + j24) = 0,1 \cdot (4 - j3) =$$
$$= 0,1 \cdot \sqrt{25} \cdot e^{-j\mathrm{arctg}(0,75)} = 0,5 \cdot e^{-j36,87°} \text{ А.}$$

Вычислим комплексное напряжение $\dot{U}_{10}$ между узлами 1 и 0 схемы:

$$\dot{U}_{10} = \dot{I}_{mL} \cdot Z_{э2} = 0,5 \cdot e^{-j36,87°} \cdot 16 \cdot \sqrt{5} \cdot e^{-j26,57°} = 17,89 \cdot e^{-j63,44°} \text{ В.}$$

Вычислим комплексные амплитуды токов $\dot{I}_{m1}$ и $\dot{I}_{m2}$:

$$\dot{I}_{m1} = \dot{U}_{10}/Z_{э1} = 17,89 \cdot e^{-j63,44°} / (56,57 \cdot e^{-j45°}) = 0,3162 \cdot e^{-j18,44°} \text{ А;}$$
$$\dot{I}_{m2} = \dot{U}_{10}/Z_2 = 17,89 \cdot e^{-j63,44°} / 80 = 0,2236 \cdot e^{-j63,44°} \text{ А.}$$

Вычислим комплексные амплитуды напряжений $\dot{U}_{mL}$, $\dot{U}_{mC}$, $\dot{U}_{m1}$, $\dot{U}_{m2}$:

$$\dot{U}_{mL} = \dot{I}_{mL} \cdot Z_L = 0,5 \cdot e^{-j36,87°} \cdot 40 \cdot e^{j90°} = 20 \cdot e^{j53,13°} \text{ В;}$$
$$\dot{U}_{mC} = \dot{I}_{m1} \cdot Z_C = 0,3162 \cdot e^{-j18,44°} \cdot 40 \cdot e^{-j90°} = 12,648 \cdot e^{-j108,44°} \text{ В;}$$
$$\dot{U}_{m1} = \dot{I}_{m1} \cdot Z_1 = 0,3162 \cdot e^{-j18,44°} \cdot 40 = 12,648 \cdot e^{-j18,44°} \text{ В;}$$
$$\dot{U}_{m2} = \dot{I}_{m2} \cdot Z_2 = 0,2236 \cdot e^{-j63,44°} \cdot 80 = 17,888 \cdot e^{-j63,44°} \text{ В.}$$

3. Осуществляем переход от найденных комплексных амплитуд токов и напряжений к их мгновенным значениям по формулам

$$i(t) = \mathrm{Re}\,[\dot{I}_m \cdot e^{j\omega t}]; \; u(t) = \mathrm{Re}\,[\dot{U}_m \cdot e^{j\omega t}].$$

Получим для $\omega = 10^5$ рад/с мгновенные значения токов $i(t)$, А, и напряжений $u(t)$, В:

$$i_L(t) = 0,5 \cdot \cos(\omega t - 36,87°) \text{ А; } i_1(t) = 0,3162 \cdot \cos(\omega t - 18,44°) \text{ А;}$$
$$i_2(t) = 0,2236 \cdot \cos(\omega t - 63,44°) \text{ А; } u_L(t) = 20 \cdot \cos(\omega t + 53,13°) \text{ В;}$$
$$u_C(t) = 12,648 \cdot \cos(\omega t - 108,44°) \text{ В; } u_1(t) = 12,648 \cdot \cos(\omega t - 18,44°) \text{ В;}$$
$$u_2(t) = 17,888 \cdot \cos(\omega t - 63,44°) \text{ В.}$$

Действующие значения гармонических токов и напряжений вычислены по формулам $I = I_m/\sqrt{2}$, $U = U_m/\sqrt{2}$ и представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

I_L, А	I_1, А	I_2, А	U_L, В	U_C, В	U_1, В	U_2, В	U, В
0,3536	0,2236	0,1581	14,142	8,945	8,945	12,649	14,142

3.4. Применение символического метода для расчета мощности. Уравнение баланса средней мощности. Условие получения в нагрузке максимальной средней мощности

Под комплексной мощностью понимается величина, определяемая по формуле

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^{*} = U \cdot I \cdot \cos\varphi + j \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi = P + jQ,$$

где $\dot{U}$ – комплексное действующее значение напряжения на зажимах источника;

$\dot{I}^{*}$ – величина, комплексно сопряженная с комплексным действующим значением тока через зажимы источника, т. е. если

$$\dot{I} = |\dot{I}| \cdot e^{j\psi}, \text{ то } \dot{I}^{*} = |\dot{I}| \cdot e^{-j\psi}.$$

Вещественная часть комплексной мощности равна средней мощности $P_{\text{ист}} = U \cdot I \cdot \cos\varphi$ (Вт), отдаваемой источником, коэффициент при мнимой части равен реактивной мощности $Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$ (вар).

Баланс средней мощности состоит в равенстве средних мощностей $P_{\text{ист}}$, отдаваемых источниками, средним мощностям $P_{\text{пот}}$, потребляемым цепью:

$$\sum_{k=1}^{m} \mathrm{Re}\left[\dot{U}_{k\,\text{ист}} \cdot \dot{I}^{*}_{k\,\text{ист}}\right] = \sum_{k=1}^{n} I_k^2 \cdot R_k,$$

где m – число источников; n – число резистивных сопротивлений цепи.

Баланс реактивной мощности состоит в равенстве реактивных мощностей Q источников, реактивным мощностям Q элементов L и C:

$$\sum_{k=1}^{m} \mathrm{Im}\left[\dot{U}_{k\,\text{ист}} \cdot \dot{I}^{*}_{k\,\text{ист}}\right] = \sum_{k=1}^{n} I_k^2 \cdot \omega L_k - \sum_{k=1}^{l} I_k^2 \cdot \frac{1}{\omega C_k},$$

где m – число источников; n – число индуктивностей в цепи, l – число емкостей в цепи.

Эти соотношения для баланса средней и реактивной мощностей могут использоваться для проверки решений задач анализа режима гармонических колебаний символическим методом.

Генератор гармонических колебаний с комплексным задающим напряжением $\dot{U}_0$ и внутренним сопротивлением $Z_0 = R_0 + jX_0$ развивает в нагрузке $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}} + jX_{\text{н}}$ максимальную среднюю мощность $P_{\max}$, если

$\mathrm{Im}(Z_н) + \mathrm{Im}(Z_0) = X_н + X_0 = 0$ и $\mathrm{Re}(Z_н) = \mathrm{Re}(Z_0)$, $R_н = R_0$ (рис. 3.8), т. е. если сопротивление нагрузки сопряжено с внутренним сопротивлением генератора: $Z_н = R_0 - jX_0$. При этом

$$P_{\max} = \frac{U_0^2}{4R_0}.$$

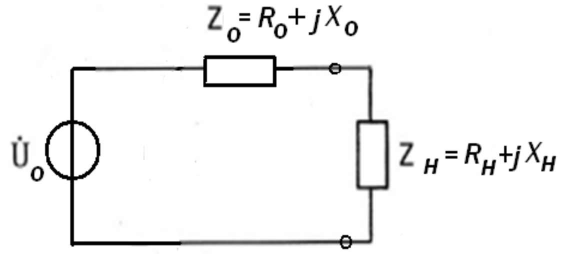


Рис. 3.8

3.5. Цепи с взаимными индуктивностями. Особенности составления уравнений для цепей с магнитными связями

Индуктивные элементы, находящиеся в общем магнитном поле, оказывают при изменении во времени протекающих по ним токов взаимное влияние друг на друга, которое наиболее существенно проявляется у близко расположенных или размещенных на общем сердечнике индуктивных катушек. Такие элементы электрических цепей называют индуктивно связанными (рис. 3.9).

Магнитная связь катушек характеризуется коэффициентом взаимной индуктивности M (Гн):

$$M = k\sqrt{L_1 \cdot L_2},$$

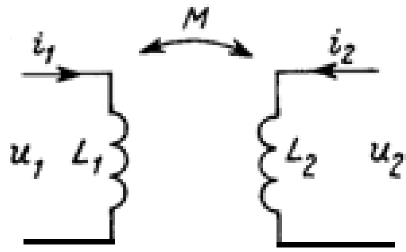


Рис. 3.9

где $0 \leq k \leq 1$. Коэффициент k называют коэффициентом связи, он количественно характеризует степень магнитной связи между катушками. В случае «жесткой» связи, когда весь магнитный поток, сцепляющийся с витками одной катушки, сцепляется с витками другой, $k = 1$. Отсутствие связи между катушками соответствует значению $k = 0$.

Рассмотрим явление взаимоиндукции, согласно которому при наличии двух и более индуктивных катушек с общим магнитным потоком напряжение в любой из таких катушек зависит от изменения не только тока, протекающего через катушку, но и от токов, протекающих через другие индуктивно связанные с ней катушки.

Будем идеализировать свойства реальных катушек с индуктивными связями, считая, что они не рассеивают энергию (не содержат резистивных сопротивлений), и что каждая катушка характеризуется только своей индуктивностью.

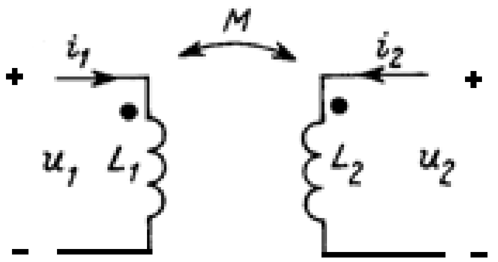
Соотношения для напряжений и токов на внешних зажимах двух индуктивно связанных идеализированных катушек имеют вид:

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \dfrac{di_1}{dt} \pm M \cdot \dfrac{di_2}{dt}; \\ u_2 = \pm M \cdot \dfrac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \dfrac{di_2}{dt}. \end{cases}$$

Эти уравнения показывают, что если между двумя катушками цепи существует магнитная связь через взаимную индуктивность M, то в первую катушку вносится напряжение $\pm M \cdot \frac{di_2}{dt}$, обусловленное током i_2 во второй катушке, а во вторую катушку ток i_1, протекающий в первой катушке, вносит напряжение $\pm M \cdot \frac{di_1}{dt}$.

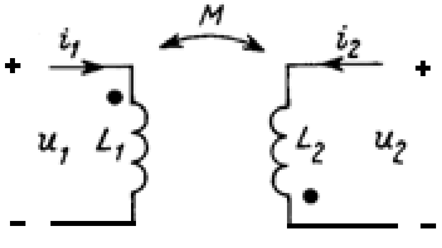
Знаки слагаемых зависят от направлений магнитных потоков в катушках, а последние – от направлений токов, которые проходят через катушки. Различают согласное и встречное включение катушек. В первом случае магнитные потоки складываются, а в уравнениях перед M стоит «плюс». А во втором случае магнитные потоки вычитаются, а в уравнениях перед M стоит «минус».

При согласном включении двух индуктивно связанных катушек (рис. 3.10) токи одинаково направлены относительно калибровочных меток – точек, показывающих начало намотки катушек, а значит, магнитные потоки обеих катушек складываются, а при встречном включении (рис. 3.11) – наоборот.



$$\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \dfrac{di_1}{dt} + M \cdot \dfrac{di_2}{dt}; \\ u_2 = M \cdot \dfrac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \dfrac{di_2}{dt} \end{cases}$$

Рис. 3.10



$$\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \dfrac{di_1}{dt} - M \cdot \dfrac{di_2}{dt}; \\ u_2 = -M \cdot \dfrac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \dfrac{di_2}{dt} \end{cases}$$

Рис. 3.11

Если индуктивно связанные катушки находятся в режиме гармонических колебаний, то комплексные напряжения и токи на зажимах пары катушек удовлетворяют системе уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = j\omega L_1 \cdot \dot{I}_1 \pm j\omega M \cdot \dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = \pm j\omega M \cdot \dot{I}_1 + j\omega L_2 \cdot \dot{I}_2. \end{cases} \tag{3.1}$$

Пример

Для цепи с заданными параметрами (рис. 3.12): $u(t) = 10\cos(10^5 t + 30°)$, В, $R_1 = R_2 = 100$ Ом, $L_1 = 8$ мГн, $L_2 = 3$ мГн, $M = 4$ мГн, $C_1 = 20$ нФ – найти комплексное входное сопротивление цепи $Z_{\text{вх}}(j\omega)$ и ток $i(t)$.

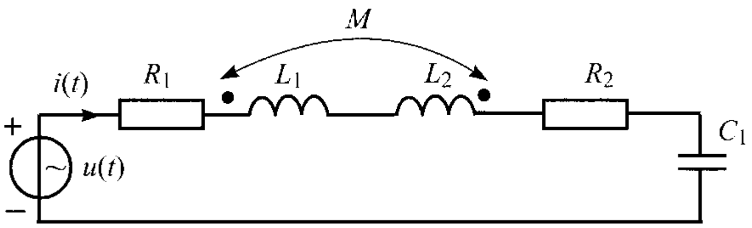


Рис. 3.12

Решение

Применим символический метод. Перейдем к комплексной схеме замещения цепи (рис. 3.13). Определим параметры цепи:

$$\dot{U}_m = 10 \cdot e^{j30°}, \text{В}$$

$$Z_C = -j\frac{1}{\omega C_1} = -j\frac{1}{10^5 \cdot 20 \cdot 10^{-9}} = -j500 \text{ Ом}.$$

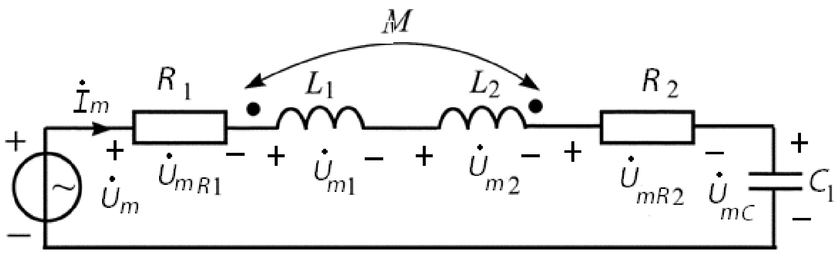


Рис. 3.13

Запишем второй закон Кирхгофа для приведенной цепи:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{mR1} + \dot{U}_{m1} + \dot{U}_{m2} + \dot{U}_{mR2} + \dot{U}_{mC}.$$

Выразим напряжения на резистивных сопротивлениях и емкости, используя закон Ома в комплексной форме:

$$\dot{U}_{mR1} = R_1 \cdot \dot{I}_m; \;\; \dot{U}_{mR2} = R_2 \cdot \dot{I}_m; \;\; \dot{U}_{mC} = Z_C \cdot \dot{I}_m.$$

Напряжения на индуктивностях запишем, используя выражения (3.1):

$$\dot{U}_{m1} = j\omega L_1 \cdot \dot{I}_m - j\omega M \cdot \dot{I}_m;$$
$$\dot{U}_{m2} = -j\omega M \cdot \dot{I}_m + j\omega L_2 \cdot \dot{I}_m.$$

Катушки включены встречно, поэтому в выражениях стоит знак «минус». Катушки соединены последовательно, поэтому через них протекает один и тот же ток $\dot{I}_m$.

Таким образом, входное напряжение $\dot{U}_m$ определяется выражением:

$$\dot{U}_m = R_1 \cdot \dot{I}_m + j\omega L_1 \cdot \dot{I}_m - j\omega M \cdot \dot{I}_m - j\omega M \cdot \dot{I}_m + j\omega L_2 \cdot \dot{I}_m + R_2 \cdot \dot{I}_m +$$
$$+ Z_C \cdot \dot{I}_m = \dot{I}_m \cdot \ (R_1 + R_2 + Z_C + j\omega \cdot (L_1 + L_2 - 2 \cdot M)),$$

откуда получим

$$Z_{\text{вх}}(j\omega) = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = R_1 + R_2 + Z_C + j\omega \cdot (L_1 + L_2 - 2 \cdot M).$$

Подставив численные значения, имеем

$$Z_{\text{вх}}(j\omega) = 100 + 100 - j500 + j10^5 \cdot (8 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}) =$$
$$= 200 - j200 = 200 \cdot \sqrt{2} \ \cdot e^{-j45°} \text{ Ом}.$$

Рассчитаем комплексную амплитуду тока $\dot{I}_m$ (А):

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{Z_{\text{вх}}(j\omega)} = \frac{10 \cdot e^{j30°}}{200 \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-j45°}} = 0{,}035 \cdot e^{j75°}.$$

Перейдем к мгновенному значению тока $i(t)$ (А):

$$i(t) = 0{,}035 \cos(10^5 t + 75°).$$

3.6. Трансформатор с воздушным сердечником. Уравнение трансформатора. Т-образная схема замещения трансформатора

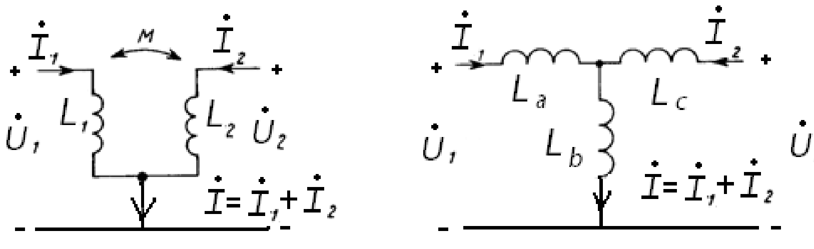
Трансформатором называется устройство, предназначенное для преобразования переменных напряжений и токов.

Трансформаторы состоят из двух или нескольких индуктивно связанных катушек или обмоток, расположенных на общем сердечнике, выполненном из ферромагнитного или неферромагнитного материала.

Рассмотрим простейший двухобмоточный трансформатор без сердечника. Такой трансформатор принято называть трансформатором с воздушным сердечником.

Обмотка трансформатора, к которой подводится входное напряжение u_1, называется первичной обмоткой. Обмотка, к которой присоединяется нагрузка, – вторичной. Число витков первичной обмотки равно w_1, а число витков вторичной обмотки – w_2. Электромагнитная энергия из первичной обмотки во вторичную передается путем взаимоиндукции.

Получим Т-образную схему замещения воздушного трансформатора. Если две индуктивно связанные катушки (рис. 3.14, *а*) имеют общую точку, то их можно заменить Т-образной схемой замещения, не содержащей индуктивных связей (рис. 3.14, *б*).



а) б)

Рис. 3.14

Составив уравнения по первому и второму законам Кирхгофа, можно найти условия, при которых схема на рис. 3.14, *б* будет полностью эквивалента схеме на рис. 3.14, *а*.

Уравнения для схемы на рис. 3.14, *а* были получены и записаны в (3.1)

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = j\omega L_1 \cdot \dot{I}_1 \pm j\omega M \cdot \dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = \pm j\omega M \cdot \dot{I}_1 + j\omega L_2 \cdot \dot{I}_2. \end{cases}$$

Уравнения для схемы на рис. 3.14, *б* имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = j\omega L_{\text{a}} \cdot \dot{I}_1 \pm j\omega L_b \cdot \left(\dot{I}_1 + \dot{I}_2\right) = j\omega(L_{\text{a}} \pm L_b) \cdot \dot{I}_1 \pm j\omega L_b \cdot \dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = \pm j\omega L_b \cdot \left(\dot{I}_1 + \dot{I}_2\right) + j\omega L_C \cdot \dot{I}_2 = \pm j\omega L_b \cdot \dot{I}_1 + j\omega(L_C \pm L_b) \cdot \dot{I}_2. \end{cases} \quad (3.2)$$

Уравнения (3.2) переходят в (3.1) при выполнении следующих условий:

$$L_1 = L_{\text{a}} \pm L_b;$$
$$M = \pm L_b;$$
$$L_2 = L_{\text{c}} \pm L_b.$$

Из этих соотношений можно найти параметры Т-образной схемы замещения индуктивно связанных катушек (табл. 3.2).

Таблица 3.2

В общем виде	При согласном включении	При встречном включении
$L_{\text{a}} = L_1 \mp M$	$L_{\text{a}} = L_1 - M$	$L_{\text{a}} = L_1 + M$
$L_b = \pm M$	$L_b = M$	$L_b = -M$
$L_{\text{c}} = L_2 \mp M$	$L_{\text{c}} = L_2 - M$	$L_{\text{c}} = L_2 + M$

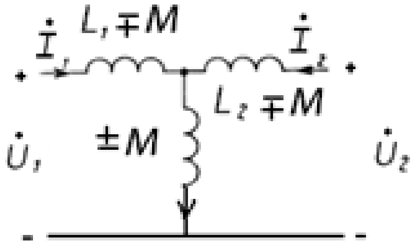


Рис. 3.15

Полученную схему называют Т-образной схемой замещения трансформатора, параметры которого не исключают возможности появления отрицательной индуктивности (рис. 3.15).

Наличие отрицательной индуктивности в рассмотренной схеме замещения цепи не препятствует применению последней при анализе колебаний в цепи, хотя и свидетельствует о невозможности физического осуществления цепи по такой схеме на пассивных элементах.

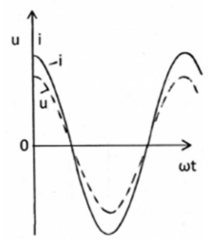
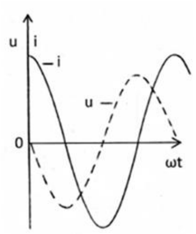
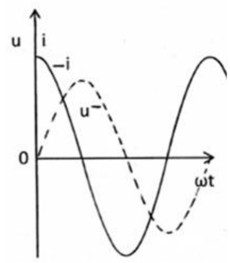
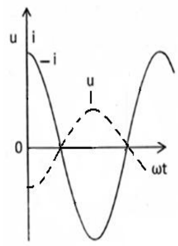
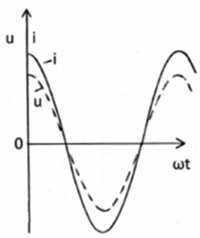
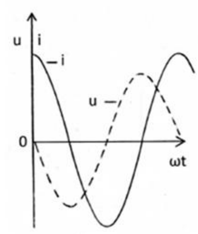
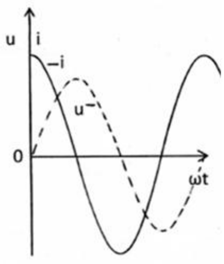
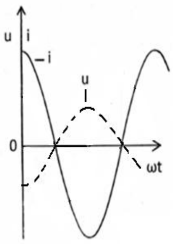
Тесты

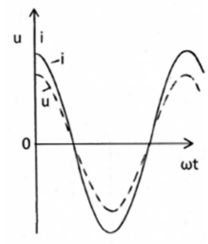
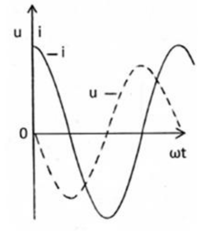
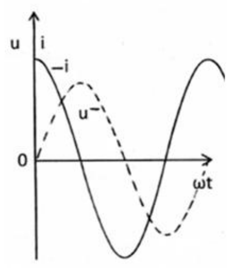
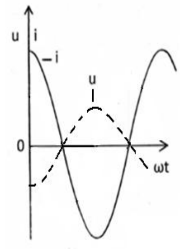
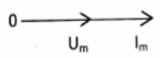
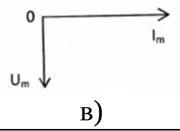
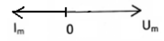
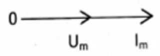
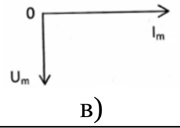
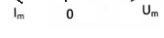
После разбора решения типовых задач предлагается выполнить тесты (табл. 3.3).

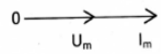
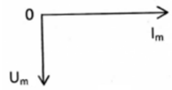
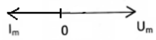
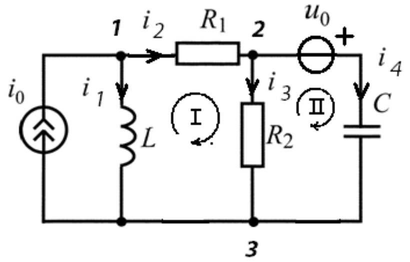
Таблица 3.3

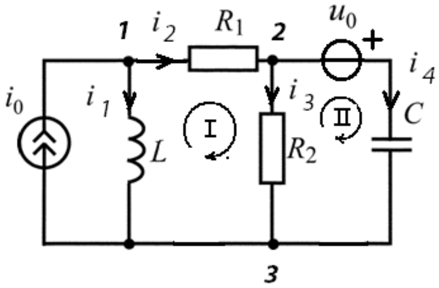
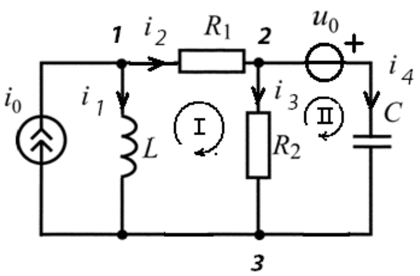
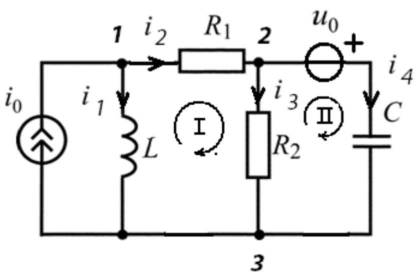
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
1	Гармоническое колебание описывается функцией	а) $f(t)=F_m \cdot \sin(\omega t+\Theta)$; б) $f(t)=F_m \cdot \cos(\omega t+\psi)$; в) $f(t)=\omega t+\Theta$; г) $f(t)=F_m$
2	Амплитудой гармонического колебания называют	а) наименьшее значение времени, после которого процесс полностью повторяется; б) наименьшее по абсолютному значению отклонение колеблющейся величины; в) наибольшее по абсолютному значению отклонение колеблющейся величины; г) наибольшее значение времени, после которого процесс полностью повторяется
3	Периодом гармонического колебания называют	а) наименьшее значение времени, после которого процесс полностью повторяется; б) наименьшее по абсолютному значению отклонение колеблющейся величины; в) наибольшее по абсолютному значению отклонение колеблющейся величины; г) наибольшее значение времени, после которого процесс полностью повторяется
4	Циклической частотой f гармонического колебания называют	а) наименьшее значение времени, после которого процесс полностью повторяется; б) наибольшее значение времени, после которого процесс полностью повторяется; в) число циклов колебания в единицу времени; г) число циклов колебания в интервале, равном 2π единицам времени

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
5	Угловой частотой ω гармонического колебания называют	а) наименьшее значение времени, после которого процесс полностью повторяется; б) наибольшее значение времени, после которого процесс полностью повторяется; в) число циклов колебания в единицу времени; г) число циклов колебания в интервале, равном 2π единицам времени
6	Фазой гармонического колебания называют	а) $(\omega t + \psi)$; б) ψ; в) число циклов колебания в единицу времени; г) число циклов колебания в интервале, равном 2π единицам времени
7	Начальной фазой гармонического колебания называют	а) $(\omega t + \psi)$; б) ψ; в) число циклов колебания в единицу времени; г) число циклов колебания в интервале, равном 2π единицам времени
8	Действующим значением гармонического колебания называют	а) наименьшее значение времени, после которого процесс полностью повторяется; б) наибольшее по абсолютному значению отклонение колеблющейся величины; в) $F = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T f^2 dt}$; г) $F = \frac{F_m}{\sqrt{2}}$
9	На резистивном сопротивлении ток и напряжение	а) находятся в противофазе; б) совпадают по фазе; в) сдвинуты по фазе на угол $\pi/2$; г) связаны законом Ома
10	Амплитуды гармонического напряжения и тока на резистивном сопротивлении связаны следующим соотношением	а) $U_m = \frac{1}{\omega R} \cdot I_m$; б) $U_m = \omega R \cdot I_m$; в) сдвинуты по фазе на угол $\pi/2$; г) $U_m = R \cdot I_m$
11	На индуктивности ток и напряжение	а) ток и напряжение находятся в противофазе; б) ток и напряжение совпадают по фазе; в) гармонические колебания тока отстают по фазе от колебаний напряжения на угол $\pi/2$; г) гармонические колебания тока опережают по фазе колебания напряжения на угол $\pi/2$
12	Амплитуды гармонического напряжения и тока на индуктивности связаны следующим соотношением	а) $U_m = \frac{1}{\omega L} \cdot I_m$; б) $I_m = \frac{1}{\omega L} \cdot U_m$; в) $U_m = \omega L \cdot I_m$; г) $U_m = L \cdot I_m$

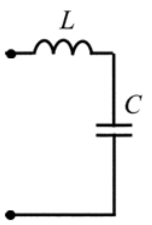
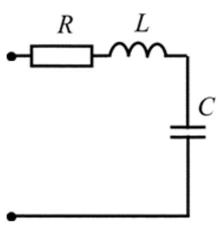
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
13	На емкости ток и напряжение	а) ток и напряжение находятся в противофазе; б) ток и напряжение совпадают по фазе; в) гармонические колебания тока отстают по фазе от колебаний напряжения на угол π/2; г) гармонические колебания тока опережают по фазе колебания напряжения на угол π/2
14	Амплитуды гармонического напряжения и тока на емкости связаны следующим соотношением	а) $U_m = \frac{1}{\omega C} \cdot I_m$; б) $U_m = \omega C \cdot I_m$; в) $I_m = \omega C \cdot U_m$; г) $U_m = C \cdot I_m$
15	На каком графике показаны напряжения и токи на резистивном сопротивлении?	 а)  б)  в)  г)
16	На каком графике показаны напряжения и токи на индуктивности?	 а)  б)  в)  г)

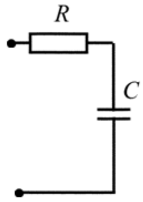
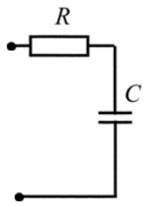
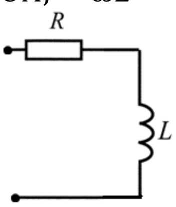
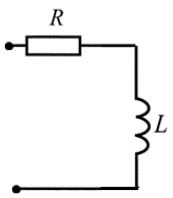
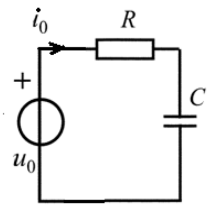
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
17	На каком графике показаны напряжения и токи на емкости?	  а) б)   в) г)
18	Мгновенная мощность гармонических колебаний в общем случае, когда ток и напряжение сдвинуты по фазе на некоторый угол $\varphi = \psi_u - \psi_i$, определяется по формуле	*а)* $U \cdot I \cdot \cos\varphi$; б) $U \cdot I \cdot \cos\varphi + U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \psi_u + +\psi_i)$; в) $U \cdot I \cdot \sin\varphi$; г) $\frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt$
19	Средняя мощность гармонических колебаний в общем случае, когда ток и напряжение сдвинуты по фазе на некоторый угол $\varphi = \psi_u - \psi_i$, определяется по формуле	а) $U \cdot I \cdot \cos\varphi$; б) $U \cdot I \cdot \cos\varphi + U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)$; в) $U \cdot I \cdot \sin\varphi$; г) $\frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt$
20	Векторная диаграмма гармонических колебаний на резистивном сопротивлении показана на рисунке	  а) б)   в) г)
21	Векторная диаграмма гармонических колебаний на индуктивности показана на рисунке	  а) б)   в) г)

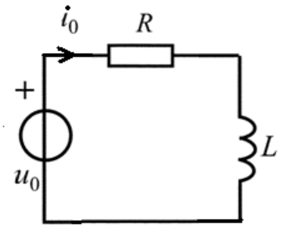
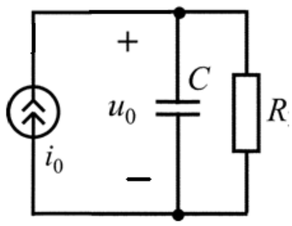
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
22	Векторная диаграмма гармонических колебаний на емкости показана на рисунке	 а)  б)  в)  г)
23	Напряжение на зажимах линейной электрической цепи определяется формулой $u(t) = 5\ \cdot\ \cos(\omega t + 45°)$, В. Комплексная амплитуда напряжения $\dot{U}_m$	а) $\dot{U}_m = 45\ \cdot\ e^{-j5°}$, В; б) $\dot{U}_m = 5\ \cdot\ e^{-j45°}$, В; в) $\dot{U}_m = 5\ \cdot\ e^{j45°}$, В; г) $\dot{U}_m = 5\ \cdot\ e^{-j5°}$, В
24	Комплексная амплитуда напряжения $\dot{U}_m = 20\ \cdot\ e^{j45°}$, В. Мгновенное значение напряжения $u(t)$ определяется формулой	а) $u(t) = 45\ \cdot\ \cos(\omega t - 20°)$, В; б) $u(t) = 20\ \cdot\ \cos(\omega t - 45°)$, В; в) $u(t) = 20\ \cdot\ \cos(\omega t + 45°)$, В; г) $u(t) = 45\ \cdot\ \cos(\omega t + 20°)$, В
25	Комплексная амплитуда напряжения $\dot{U}_m = 5 + j5$, В. Мгновенное значение напряжения $u(t)$ равно	а) $u(t) = 5 \cdot \cos(\omega t - 45°)$, В; б) $u(t) = 5 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t - 45°)$, В; в) $u(t) = 5 \cdot \cos(\omega t + 45°)$, В; г) $u(t) = 5 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + 45°)$, В
26	Комплексная амплитуда тока $\dot{I}_m = 2 - j2$, мА . Действующее значение тока $i(t)$ равно	а) $I = 2$, мА; б) $I = 2 \cdot \sqrt{2}$, мА; в) $I = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2}}$, мА; г) $I = \frac{2}{\sqrt{2}}$, мА
27	Напряжение на зажимах линейной электрической цепи $u(t) = 15 \cdot \cos(\omega t - 45°)$, В. Действующее значение напряжения равно	а) $U = 45$, В; б) $U = 15 \cdot \sqrt{2}$, В; в) $U = \frac{15}{\sqrt{2}}$, В; г) $U = 15$, В
28	Уравнение по второму закону Кирхгофа в комплексной форме для 1-го контура может быть записано в виде 	а) $\dot{I}_2 \cdot R_1 + \dot{I}_3 \cdot R_2 - \dot{I}_1 \cdot j\omega L = 0$; б) $\dot{I}_2 \cdot R_1 - \dot{I}_3 \cdot R_2 - \dot{I}_1 \cdot j\omega L = 0$; в) $\dot{I}_2 \cdot R_2 - \dot{I}_3 \cdot R_3 - \dot{I}_1 \cdot j\omega L = 0$; г) $\dot{I}_2 \cdot R_1 - \dot{I}_3 \cdot R_2 + \dot{I}_1 \cdot j\omega L = 0$

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
29	Уравнение по второму закону Кирхгофа в комплексной форме для 2-го контура может быть записано в виде  	$а)\ \dot{I}_2 \cdot R_1 + \dot{I}_3 \cdot R_2 - \dot{I}_1 \cdot j\omega L = 0;$ б) $\dot{I}_4 \cdot \frac{1}{j\omega C} - \dot{I}_3 \cdot R_2 + \dot{U}_0 = 0;$ в) $\dot{I}_4 \cdot \frac{1}{j\omega C} - \dot{I}_3 \cdot R_2 - \dot{U}_0 = 0;$ г) $\dot{I}_2 \cdot R_1 - \dot{I}_3 \cdot R_2 + \dot{I}_1 \cdot j\omega L = 0$
30	Уравнение по первому закону Кирхгофа в комплексной форме для 1-го узла может быть записано в виде  	$а)\ \dot{I}_2 \cdot R_1 + \dot{I}_3 \cdot R_2 - \dot{I}_1 \cdot j\omega L = 0;$ б) $\dot{I}_4 \cdot \frac{1}{j\omega C} - \dot{I}_3 \cdot R_2 + \dot{U}_0 = 0;$ в) $\dot{I}_4 - \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = 0;$ г) $-\dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0$
31	Уравнение по первому закону Кирхгофа в комплексной форме для 2-го узла может быть записано в виде  	$а)\ \dot{I}_4 + \dot{I}_3 - \dot{I}_2 = 0;$ б) $\dot{I}_4 \cdot \frac{1}{j\omega C} - \dot{I}_3 \cdot R_2 + \dot{U}_0 = 0;$ в) $\dot{I}_4 - \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = 0;$ г)$-\dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0$
32	Чему равно комплексное сопротивление емкости?	а) $j\omega C$; б) $-j\omega C$; в) $\frac{1}{j\omega C}$; г) $\frac{-j}{\omega C}$
33	Чему равно комплексное сопротивление индуктивности?	а) $j\omega L$; б) $-j\omega L$; в) $\frac{1}{j\omega L}$; г) $\frac{-j}{\omega L}$
34	Чему равна комплексная проводимость емкости?	а) $j\omega C$; б) $-j\omega C$; в) $\frac{1}{j\omega C}$; г) $\frac{-j}{\omega C}$

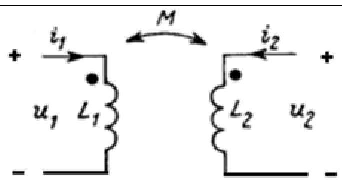
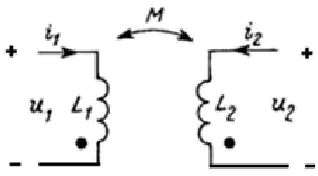
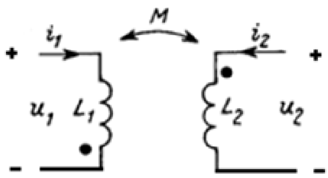
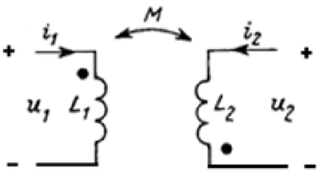
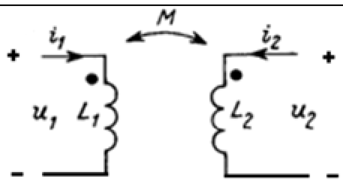
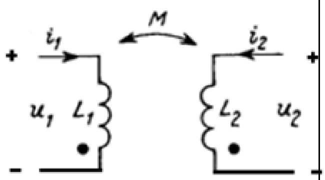
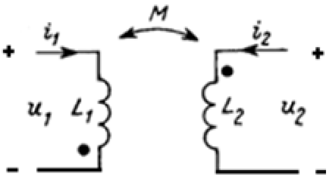
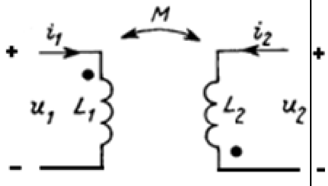
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
35	Чему равна комплексная проводимость индуктивности?	а) $j\omega L$; б) $-j\omega L$; в) $\frac{1}{j\omega L}$; г) $\frac{-j}{\omega L}$
36	Модуль комплексного сопротивления пассивного двухполюсника равен	а) отношению амплитуды напряжения на внешних зажимах двухполюсника к действующему значению тока, который проходит через эти зажимы; б) отношению действующего значения напряжения на внешних зажимах двухполюсника к действующему значению тока, который проходит через эти зажимы; в) отношению амплитуды напряжения на внешних зажимах двухполюсника к амплитуде тока, который проходит через эти зажимы; г) отношению амплитуды тока, который проходит через внешние зажимы двухполюсника, к амплитуде напряжения на этих зажимах
37	Модуль комплексной проводимости пассивного двухполюсника равен	а) отношению амплитуды тока, который проходит через внешние зажимы двухполюсника, к действующему значению напряжения на этих зажимах; б) отношению действующего значения напряжения на внешних зажимах двухполюсника к действующему значению тока, который проходит через эти зажимы; в) отношению амплитуды напряжения на внешних зажимах двухполюсника к амплитуде тока, который проходит через эти зажимы; г) отношению амплитуды тока, который проходит через внешние зажимы двухполюсника, к амплитуде напряжения на этих зажимах
38	Аргумент комплексного сопротивления пассивного двухполюсника равен	а) разности фаз колебаний напряжения и тока на внешних зажимах двухполюсника; б) $\frac{\pi}{2}$; в) $-\frac{\pi}{2}$; г) разности фаз колебаний тока и напряжения на внешних зажимах двухполюсника
39	Аргумент комплексной проводимости пассивного двухполюсника равен	а) разности фаз колебаний напряжения и тока на внешних зажимах двухполюсника; б) $\frac{\pi}{2}$; в) $-\frac{\pi}{2}$; г) разности фаз колебаний тока и напряжения на внешних зажимах двухполюсника

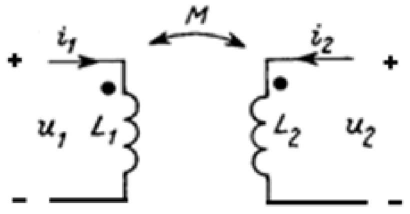
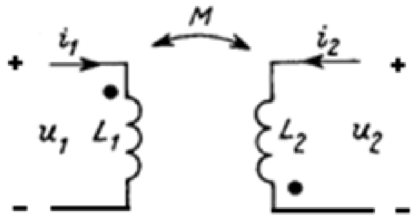
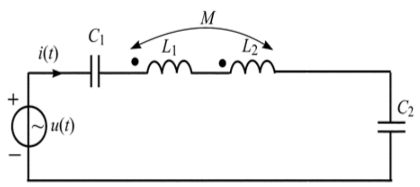
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
40	Какие значения может принимать аргумент комплексной проводимости пассивной цепи φ_Y?	а) от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$; б) от $-\pi$ до π; в) от $-\frac{\pi}{2}$ до π; г) от $\frac{\pi}{2}$ до π
41	Чему равен ток $i(t)$ на зажимах двухполюсника, если известны его комплексное сопротивление и напряжение на его зажимах $Z(j\omega)=10^3 e^{-j45^\circ}$, Ом; $u(t)=10\cos(10^4 t-20^\circ)$, В	а) $i(t) = 2 \cdot \cos(\omega t - 45°)$, мА; б) $i(t) = 10 \cdot \cos(\omega t - 45°)$, мА; в) $i(t) = 10 \cdot \cos(\omega t + 25°)$, мА; г) $i(t) = 10 \cdot \cos(\omega t - 20°)$, мА
42	Чему равно комплексное сопротивление двухполюсника $Z(j\omega)$, если известны ток и напряжение на его зажимах $i(t)=20\cos(10^5 t+20^\circ)$, мА; $u(t)=80\cos(10^5 t+65^\circ)$, В	а) $Z(j\omega) = 40 \cdot e^{j45°}$, кОм б) $Z(j\omega) = 4 \cdot e^{j45°}$, кОм; в) $Z(j\omega) = 40 \cdot e^{-j45°}$, кОм; г) $Z(j\omega) = 4 \cdot e^{-j45°}$, кОм
43	Чему равна комплексная проводимость двухполюсника $Y(j\omega)$, если известны ток и напряжение на его зажимах $i(t)=20\cos(10^5 t+20^\circ)$, мА; $u(t)=80\cos(10^5 t+65^\circ)$, В	а) $0{,}25 \cdot e^{j45°}$, мСм; б) $0{,}25 \cdot e^{-j45°}$, мСм; в) $2{,}5 \cdot e^{j45°}$, мСм; г) $2{,}5 \cdot e^{-j45°}$, мСм
44	Комплексное сопротивление цепи может быть записано как 	а) $Z(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L$; б) $Z(j\omega) = \frac{1}{j\omega L} + j\omega C$; в) $Z(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} - j\omega L$; г) $Z(j\omega) = \frac{-j}{\omega C} + j\omega L$
45	Комплексное сопротивление цепи может быть записано как 	а) $Z(j\omega) = R + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L$; б) $Z(j\omega) = R - \frac{1}{j\omega L} + j\omega C$; в) $Z(j\omega) = R + \frac{1}{j\omega C} - j\omega L$; г) $Z(j\omega) = \frac{-j}{\omega C} + j\omega L$

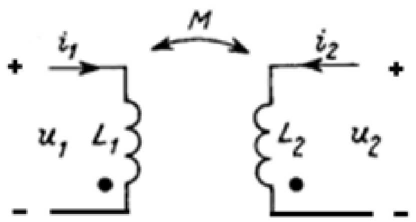
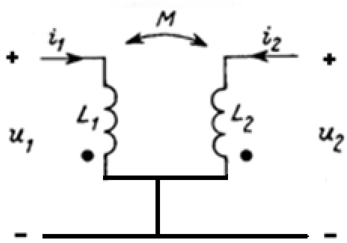
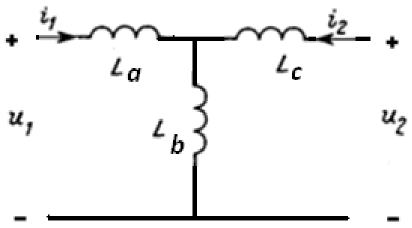
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
46	Модуль комплексного сопротивления цепи, если $R = 100$ Ом; $\frac{1}{\omega C} = 100$ Ом 	а) $\lvert Z(j\omega)\rvert = 100$ Ом; б) $\lvert Z(j\omega)\rvert = 150$ Ом; в) $\lvert Z(j\omega)\rvert = 100 \cdot \sqrt{2}$ Ом; г) $\lvert Z(j\omega)\rvert = 200$ Ом
47	Аргумент комплексного сопротивления цепи равен, если $R = 100$ Ом; $\frac{1}{\omega C} = 100$ Ом 	а) 45°; б) $-45°$; в) 75°; г) 90°
48	Модуль комплексного сопротивления цепи равен, если $R = 100$ Ом; $\omega L = 100$ Ом 	а) 100 Ом; б) $100 \cdot \sqrt{2}$ Ом; в) $200 \cdot \sqrt{2}$ Ом; г) 200
49	Аргумент комплексного сопротивления цепи равен, если $R = 100$ Ом; $\omega L = 100$ Ом 	а) 45°; б) $-45°$; в) 75°; г) 90°
50	Чему равен ток $i_0(t)$, если $u_0(t) = 10 \cdot \cos(10^5 t - 45°)$, В; $R = 100$ Ом; $C = 0{,}1$ мкФ? 	а) $i_0(t) = 0{,}071 \cdot \cos(10^5 t - 45°)$, А; б) $i_0(t) = 0{,}1 \cdot \cos(10^5 t + 25°)$, А; в) $i_0(t) = 0{,}071 \cdot \cos 10^5 t$, А; г) $i_0(t) = 0{,}1 \cdot \cos 10^5 t$, А

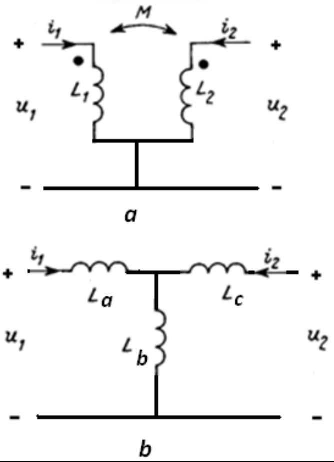
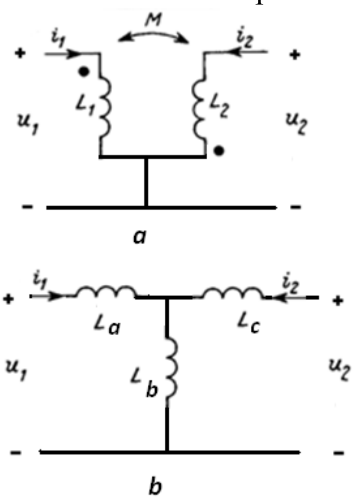
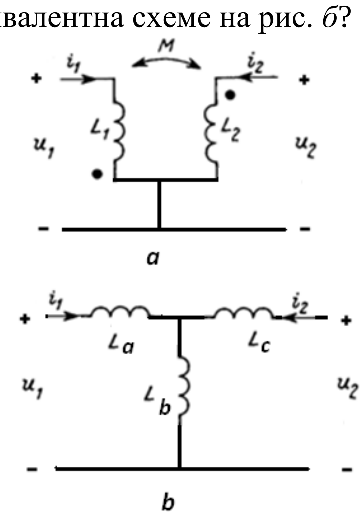
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
51	Чему равен ток $i_0(t)$, если $u_0(t) = 10 \cdot \cos(10^5 t + 45^0)$, В; $R = 100$ Ом; $L = 1$ мГн?  	а) $i_0(t) = 0{,}071 \cdot \cos(10^5 t - 45°)$, А; б) $i_0(t) = 0{,}071 \cdot \cos 10^5 t$, А; в) $i_0(t) = 0{,}071 \cdot \cos(10^5 t + 90°)$, А; г) $i_0(t) = 0{,}1 \cdot \cos 10^5 t$, А
52	Чему равно напряжение $u_0(t)$, если $i_0(t) = 0.1 \cdot \cos(10^5 t + 45°), A$; $R = 100$ Ом; $C = 0{,}1$ мкФ?  	$a)$ $u_0(t) = 7{,}071 \cdot \cos(10^5 t - 90°)$, В; б) $u_0(t) = 7{,}071 \cdot \cos 10^5 t$, В; в) $u_0(t) = 14{,}142 \cdot \cos(10^5 t + 90°)$, В; г) $u_0(t) = 10 \cdot \cos 10^5 t$, В
53	Под комплексной мощностью понимается величина, определяемая по формуле	а) $U \cdot I \cdot \cos\varphi$; б) $\dot{U} \cdot \dot{I}^*$; в) $U \cdot I \cdot \sin\varphi$; г) $U \cdot I \cdot \cos\varphi + j \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi$
54	Под средней мощностью понимается величина, определяемая по формуле	а) $U \cdot I \cdot \cos\varphi$; б) $\dot{U} \cdot \dot{I}^*$; в) $U \cdot I \cdot \sin\varphi$; г) $U \cdot I \cdot \cos\varphi + j \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi$
55	Под реактивной мощностью понимается величина, определяемая по формуле	а) $U \cdot I \cdot \cos\varphi$; б) $\dot{U} \cdot \dot{I}^*$; в) $U \cdot I \cdot \sin\varphi$; г) $U \cdot I \cdot \cos\varphi + j \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi$
56	Генератор гармонических колебаний с комплексным задающим напряжением $\dot{U}_0$ и внутренним сопротивлением $Z_0 = R_0 + jX_0$ развивает в нагрузке $Z_н = R_н + jX_н$ максимальную среднюю мощность P_{max}, если	а) $R_н = R_0$ и $X_н = -X_0$; б) $R_н = R_0$ и $X_н = X_0$; в) сопротивление нагрузки – величина, комплексно-сопряженная с внутренним сопротивлением генератора; г) $R_н = 2R_0$ и $X_н = -X_0$

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
57	Генератор гармонических колебаний с комплексным задающим напряжением $\dot{U}_0$ и внутренним сопротивлением $Z_0 = R_0 + jX_0$ развивает в нагрузке $Z_н = R_н + jX_н$ максимальную среднюю мощность P_{max}, определяемую выражением	а) $P_{max} = \frac{4U_0^2}{R_0}$; б) $P_{max} = \frac{U_0^2}{R_0}$; в) $P_{max} = \frac{U_0^2}{2R_0}$; г) $P_{max} = \frac{U_0^2}{4R_0}$
58	Баланс средней мощности	а) $\sum_{k=1}^{m} \mathrm{Im}\left[\dot{U}_{k\,ист} \cdot \dot{I}^*_{k\,ист}\right] = \sum_{k=1}^{n} I_k^2 \cdot R_k$; б) состоит в равенстве средних мощностей $P_{ист}$, отдаваемых источниками, средним мощностям $P_{пот}$, потребляемым цепью; в) состоит в равенстве реактивных мощностей $Q_{ист}$ реактивным мощностям Q элементов L и C; г) $\sum_{k=1}^{m} \mathrm{Re}\left[\dot{U}_{k\,ист} \cdot \dot{I}^*_{k\,ист}\right] = \sum_{k=1}^{n} I_k^2 \cdot R_k$
59	Баланс реактивной мощности	а) состоит в равенстве средних мощностей $P_{ист}$, отдаваемых источниками, средним мощностям $P_{пот}$, потребляемым цепью; б) $\sum_{k=1}^{m} \mathrm{Im}\left[\dot{U}_{k\,ист} \cdot \dot{I}^*_{k\,ист}\right] = \sum_{k=1}^{n} I_k^2 \cdot \omega L_k - \sum_{k=1}^{l} I_k^2 \cdot \frac{1}{\omega C_k}$; в) состоит в равенстве реактивных мощностей $Q_{ист}$ реактивным мощностям Q элементов L и C; г) $\sum_{k=1}^{m} \mathrm{Re}\left[\dot{U}_{k\,ист} \cdot \dot{I}^*_{k\,ист}\right] = \sum_{k=1}^{n} I_k^2 \cdot R_k$
60	Коэффициент взаимной индуктивности M определяется формулой	а) $M = k\sqrt{L_1 + L_2}$; б) $M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$; в) $M = k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$; г) $M = \sqrt{L_1 + L_2}$
61	В каких пределах изменяется коэффициент магнитной связи k между катушками?	а) $-1 \le k \le 1$; б) $0 \le k \le 1$; в) $0 \le k \le 0{,}5$; г) $0 \le k \le 2$

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
62	Напряжения и токи на внешних зажимах индуктивностей с магнитной связью определяются выражениями	а) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \pm (L_2 + M) \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = \pm(L_2 + M) \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ б) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \pm M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = \pm M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ в) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \pm (L_1 + M) \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = \pm(L_1 + M) \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ г) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt}; \\ u_2 = L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$
63	На каком рисунке показано согласное включение катушек?	  а) б)   в) г)
64	На каком рисунке показано встречное включение катушек?	  а) б)   в) г)

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
65	Как связаны токи и напряжения на входных зажимах в следующей цепи?  	а) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = -M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ б) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = -M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ в) $\begin{cases} u_1 = -L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} - L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ г) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$
66	Как связаны токи и напряжения на входных зажимах в следующей цепи?  	а) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = -M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ б) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = -M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ в) $\begin{cases} u_1 = -L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} - L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ г) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$
67	Если индуктивно связанные катушки находятся в режиме гармонических колебаний, то комплексные напряжения и токи на зажимах пары катушек удовлетворяют системе уравнений	а) $\begin{cases} \grave{U}_1 = -j\omega L_1 \cdot \grave{I}_1 + j\omega M \cdot \grave{I}_2; \\ \grave{U}_2 = -j\omega M \cdot \grave{I}_1 + j\omega L_2 \cdot \grave{I}_2; \end{cases}$ б) $\begin{cases} \grave{U}_1 = j\omega L_1 \cdot \grave{I}_1; \\ \grave{U}_2 = j\omega L_2 \cdot \grave{I}_2; \end{cases}$ в) $\begin{cases} \grave{U}_1 = \pm j\omega M \cdot \grave{I}_2; \\ \grave{U}_2 = \pm j\omega M \cdot \grave{I}_1; \end{cases}$ г) $\begin{cases} \grave{U}_1 = j\omega L_1 \cdot \grave{I}_1 \pm j\omega M \cdot \grave{I}_2; \\ \grave{U}_2 = \pm j\omega M \cdot \grave{I}_1 + j\omega L_2 \cdot \grave{I}_2 \end{cases}$
68	В приведенной индуктивно связанной цепи комплексное входное сопротивление $Z_{\text{вх}}(j\omega)$ определяется формулой  	$a)$ $\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega \cdot (L_1 + L_2 - 2 \cdot M);$ б) $\frac{1}{j\omega C1} + \frac{1}{j\omega C2} + j\omega \cdot (L_1 + L_2);$ в) $j\omega C_1 + j\omega C_2 + j\omega \cdot (L_1 + L_2 - 2 \cdot M);$ г) $\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega \cdot (L_1 + L_2 + 2 \cdot M)$

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
69	Первичная обмотка трансформатора – это	а) обмотка, к которой присоединяется нагрузка; б) взаимная индуктивность M; в) обмотка трансформатора, к которой подводится входное напряжение u_1; г) обмотка трансформатора, с которой снимается напряжение u_2
70	Вторичная обмотка трансформатора – это	а) обмотка, к которой присоединяется нагрузка; б) взаимная индуктивность M; в) обмотка трансформатора, к которой подводится входное напряжение u_1; г) обмотка трансформатора, с которой снимается напряжение u_2
71	Как связаны токи и напряжения на входных зажимах в следующей цепи? 	а) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = -M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ б) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = -M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ в) $\begin{cases} u_1 = -L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} - L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}; \end{cases}$ г) $\begin{cases} u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$
72	При каких условиях схема на рис. *а* эквивалентна схеме на рис. *б*?  a  b	*а)* $L_a = L_1 - M;\ L_b = M;\ L_c = L_2 - M;$ б) $L_a = L_1 + M;\ L_b = -M;\ L_c = L_2 + M;$ в) $L_a = L_1 - M;\ L_b = 2M;\ L_c = L_2 - M;$ г) $L_a = L_1 - 2M;\ L_b = M;\ L_c = L_2 - 2M$

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
73	При каких условиях схема на рис. *а* эквивалентна схеме на рис. *б*? 	а) $L_a = L_1 - M;\ L_b = M;\ L_c = L_2 - M;$ б) $L_a = L_1 + M;\ L_b = -M;\ L_c = L_2 + M;$ в) $L_a = L_1 - M;\ L_b = 2M;\ L_c = L_2 - M;$ г) $L_a = L_1 - 2M;\ L_b = M;\ L_c = L_2 - 2M$
74	При каких условиях схема на рис. *а* эквивалентна схеме на рис. *б*? 	а) $L_a = L_1 - M;\ L_b = M;\ L_c = L_2 - M;$ б) $L_a = L_1 + M;\ L_b = -M;\ L_c = L_2 + M;$ в) $L_a = L_1 - M;\ L_b = 2M;\ L_c = L_2 - M;$ г) $L_a = L_1 - 2M;\ L_b = M;\ L_c = L_2 - 2M$
75	При каких условиях схема на рис. *а* эквивалентна схеме на рис. *б*? 	а) $L_a = L_1 - M;\ L_b = M;\ L_c = L_2 - M;$ б) $L_a = L_1 + M;\ L_b = -M;\ L_c = L_2 + M;$ в) $L_a = L_1 - M;\ L_b = 2M;\ L_c = L_2 - M;$ г) $L_a = L_1 - 2M;\ L_b = M;\ L_c = L_2 - 2M$

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определения понятий: амплитуда, период, частота, угловая частота, фаза, начальная фаза гармонического колебания.

2. Что называют действующим значением периодического колебания? Чему равно действующее значение гармонического колебания?

3. Как определяется средняя мощность гармонических колебаний?

4. Какими соотношениями связаны амплитуды (действующие значения) гармонических тока и напряжения на резистивном сопротивлении, индуктивности, емкости?

5. Как сдвинуты по фазе ток и напряжение на резистивном сопротивлении, индуктивности, емкости?

6. Как комплексная амплитуда связана с мгновенным значением гармонического колебания? Как мгновенное значение связано с комплексной амплитудой?

7. Запишите комплексные сопротивления резистивного сопротивления, индуктивности и емкости.

8. Какой физический смысл имеет модуль, аргумент, вещественная и мнимая части комплексного сопротивления цепи?

9. Какие значения может принимать аргумент комплексного сопротивления пассивной цепи?

10. Что понимают под комплексной мощностью? Что означает ее вещественная и мнимая части?

11. Запишите условия баланса активной (средней) и реактивной мощностей.

12. Какое явление называется явлением взаимоиндукции?

13. Каковы особенности составления уравнений для линейных цепей с индуктивными связями?

Список литературы

1. *Белецкий, А. Ф.* Теория линейных электрических цепей : учебник / А. Ф. Белецкий. – 2-е изд. – СПб. : Лань, 2009. – 544 с.

2. *Бакалов, В. П.* Основы теории цепей : учебник для вузов / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. Н. Крук. – 3-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 596 с.

3. *Белецкий, А. Ф.* Анализ нелинейных резистивных цепей / А. Ф. Белецкий, В. Ф. Дмитриков, Ю. И. Лыпарь ; ЛЭИС. – Л., 1990.

4. *Белецкий, А. Ф.* Нелинейные преобразования колебаний и цепи с обратной связью : учеб. пособие для спец. 2305, 2306, 2307 / А. Ф. Белецкий, В. Ф. Дмитриков ; ЛЭИС. – Л., 1991.

Зайцева Зинаида Викторовна
Логвинова Нина Константиновна
Сергеев Валерий Варламович
Шушпанов Дмитрий Викторович

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Часть 1

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Раздел 3

Учебное пособие

Ответственный редактор *З. В. Зайцева*

Редактор *И. И. Щенсняк*

План издания 2018 г., п. 134б

Подписано к печати 12.02.2018
Объем 2,5 усл.-печ. л. Тираж 32 экз. Заказ 849

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ
193232 СПб., пр. Большевиков, 22

Отпечатано в СПбГУТ