

В. А. Большаков Т. В. Векшина
Е. М. Коринец

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Медиапапир
2024

УДК 621.3
ББК 32.85я73
Б79

Рецензент:

Сикарев Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор,
РГГМУ

Большаков В. А., Векшина Т. В., Коринец Е. М. Теория электрических цепей: Учебное пособие. — СПб.: Медиапайр, 2024. — 114 с.

Учебное пособие составлено в соответствии с рабочей программой дисциплины «Электротехника (Теория электрических цепей)». Приведены задания практических занятий с примерами их выполнения и описанием лабораторных работ, содержащие теоретическую часть, подробные инструкции по их выполнению и вопросы для самопроверки знаний. Указаны правила оформления отчетов по заданиям практических занятий и лабораторным работам. Приведен перечень рекомендуемой учебной литературы.

Предназначен для студентов всех форм обучения.

Учебное пособие по дисциплине «Электротехника (Теория электрических цепей)». Направления подготовки: 17.03.01 — Корабельное вооружение. Квалификация (степень) — Бакалавр. Курс II.

Направления подготовки

17.03.01 — Корабельное вооружение

Направленность (профиль):

Морские информационные системы и оборудование

Утверждено на заседании кафедры «Информационные технологии и системы безопасности». Протокол № 1 от 30.01.2024.

Рекомендовано к печати учебно-методической комиссией Института информационных систем и геотехнологий. Протокол № 1 от 31.01.2024.

ISBN 978-5-00110-411-7

© Большаков В. А., Векшина Т. В.,
Коринец Е. М., 2024

© Медиапайр, 2024

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ И ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТОВ

Задачи практических занятий обеспечивают закрепление знаний, получаемых при изучении разделов дисциплины. Перед решением задач следует ознакомиться с теоретическими сведениями и примерами их решения.

В отчете нужно привести условие задачи, исходные данные и принципиальные схемы электрических цепей, содержащиеся в условиях задач.

Все расчетные соотношения следует сначала записывать в виде формул и только после этого подставлять в них значения величин. Точность результатов вычислений достаточно ограничить тремя значащими цифрами. Конечные результаты задач должны приводиться в ответе. Для исходных данных и результатов вычислений следует указывать единицы измерения. Отчет должен содержать титульную страницу, форму которой задает преподаватель. Материалы отчета должны быть оформлены аккуратно, с соблюдением ГОСТ на условные графические и буквенные обозначения.

Исходные данные для задач по темам практических занятий размещены в приложениях практикума с указанными номерами тем.

ТЕМА 1

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Условие задачи

Вывести формулы для входного сопротивления электрической цепи, состоящей из резисторов со стороны указанных на схеме зажимов с помощью эквивалентных преобразований последовательных и параллельных соединений резисторов.

Методика решения

Задание выполняется путем эквивалентных преобразований последовательных и параллельных соединений резисторов. Резисторы, соединенные последовательно, можно заменить одним резистором, сопротивление

которого равно сумме их сопротивлений, а соединенные параллельно резисторы можно заменить одним резистором проводимость которого равна сумме их проводимостей.

Пример решения задачи

Определить входное сопротивление электрической цепи, схема которой представлена на рис. 1.1 со стороны зажимов «аб» и «вг».

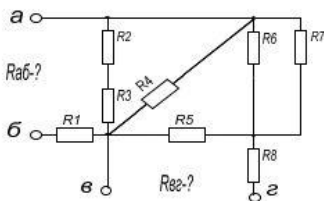


Рис. 1.1. Схема заданной электрической цепи

Решение

Схемы сворачиваются от конца к началу

Рекомендуется каждое преобразование сопровождать схемой.

- $R_{аб}$

$$R_{6,7} = \frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7}; R_{5,6,7} = R_5 + R_{6,7}; R_{4,5,6,7} = \frac{R_4 \cdot R_{5,6,7}}{R_4 + R_{5,6,7}};$$

$$R_{аб} = \frac{(R_2 + R_3) \cdot R_{4,5,6,7}}{R_2 + R_3 + R_{4,5,6,7}} + R_1$$

- $R_{вг}$

$$R_{2,3,4} = \frac{(R_2 + R_3) \cdot R_4}{R_2 + R_3 + R_4}; R_{6,7} = \frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7}; R_{2,3,4,6,7} = R_{2,3,4} + R_{6,7};$$

$$R_{вг} = \frac{R_5 \cdot R_{2,3,4,6,7}}{R_5 + R_{2,3,4,6,7}} + R_8$$

ТЕМА 2

АНАЛИЗ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Условие задачи

Для заданной схемы электрической цепи:

- найти все токи методом эквивалентных преобразований (свертывания);

- проверить найденные токи подстановкой в уравнения Кирхгофа и контурных токов;
- проверить вычисленное значение тока в заданной ветви методом эквивалентного генератора напряжения.

Методика решения

Для выполнения первого пункта задания сначала с помощью эквивалентных преобразований резисторы объединяются, схема электрической цепи приводится к одноконтурной и по закону Ома вычисляется ток в ветви источника. При этом рекомендуется после каждого преобразования, объединив резисторы, перечерчивать схему. Затем, возвращаясь к исходной схеме, вычисляются значения падений напряжения на разветвленных участках цепи и токи в ветвях.

Токи рекомендуется обозначать индексами резисторов ветви. Направления токов в ветвях цепи указывает стрелка источника (от + к – источника).

Во втором пункте для проверки токов, вычисленных методом свертывания, составляется полная система уравнений Кирхгофа. Общее количество уравнений этой системы равно числу ветвей цепи (токов). Число уравнений по первому закону равно количеству узлов минус единица, остальные по второму. При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа и уравнений контурных токов направление обхода контура и контурного тока следует выбирать, совпадающим с направлением тока в ветви, не входящей в состав других контуров (главной ветви). Уравнения контурных токов составляются для независимых контуров, уравнения узловых напряжений — для независимых узлов

В третьем пункте заданная ветвь, в которой ищется ток методом эквивалентного генератора напряжения, выделяется из цепи, что указывается зажимами (например a , b), а остальная цепь заменяется эквивалентным ей генератором напряжения с ЭДС E_0 и внутренним сопротивлением R_0 .

E_0 определяется как напряжение на зажимах a , b при отключении ветви, в которой ищется ток (в режиме холостого хода), а R_0 — как сопротивление цепи со стороны зажимов a , b в том же режиме холостого хода при замене источника E на схеме заданной цепи проводом.

Пример решения задачи

Задана схема электрической цепи, представленная на рис. 2.1.

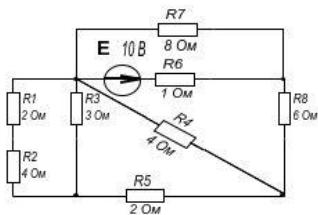


Рис. 2.1. Анализируемая электрическая цепь

Расчет токов методом свертывания

$$R_{1,2} = R_1 + R_2 = 2 + 4 = 6 \text{ Ом}; \quad R_{1,2,3} = \frac{R_{1,2} \cdot R_3}{R_{1,2} + R_3} = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} = 2 \text{ Ом}; \quad R_{1,2,3,5} = R_{1,2,3} + R_5 = 2 + 2 = 4 \text{ Ом};$$

$$R_{1-5} = \frac{R_{1,2,3,5} \cdot R_4}{R_{1,2,3,5} + R_4} = \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} = 2 \text{ Ом}; \quad R_{1-5,8} = R_{1-5} + R_8 = 2 + 6 = 8 \text{ Ом};$$

$$R_{1-5,7,8} = \frac{R_{1-5,8} \cdot R_7}{R_{1-5,8} + R_7} = \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 4 \text{ Ом}; \quad R_{1-8} = R_{1-5,7,8} + R_6 = 4 + 1 = 5 \text{ Ом}$$

$$I_6 = \frac{E}{R_{1-8}} = \frac{10}{5} = 2 \text{ А}; \quad U_{1-5,7,8} = I_6 \cdot R_{1-5,7,8} = 2 \cdot 4 = 8 \text{ В}; \quad I_7 = \frac{U_{1-5,7,8}}{R_7} = I_8 = \frac{U_{1-5,7,8}}{R_{1-5,8}} = \frac{8}{8} = 1 \text{ А};$$

$$U_{1-5} = I_8 \cdot R_{1-5} = 1 \cdot 2 = 2 \text{ В}; \quad I_4 = \frac{U_{1-5}}{R_4} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2} \text{ А}; \quad I_5 = \frac{U_{1-5}}{R_{1,2,3,5}} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2} \text{ А};$$

$$U_{1,2,3} = I_5 \cdot R_{1,2,3} = \frac{1}{2} \cdot 2 = 1 \text{ В}; \quad I_3 = \frac{U_{1,2,3}}{R_3} = \frac{1}{3} \text{ В}; \quad I_{1,2} = \frac{U_{1,2,3}}{R_{1,2}} = \frac{1}{6} \text{ А}$$

Проверка токов по уравнениям Кирхгофа

$$I_5 - I_{1,2} - I_3 = 0; \quad \frac{1}{2} - \frac{1}{6} - \frac{1}{3} = 0 \text{ А}$$

$$I_6 - I_7 - I_8 = 0; \quad 2 - 1 - 1 = 0 \text{ А}$$

$$I_8 - I_4 - I_5 = 0; \quad 1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0 \text{ А}$$

$$I_6 \cdot R_6 + I_7 \cdot R_7 = E; \quad 2 \cdot 1 + 1 \cdot 8 = 10 \text{ В}$$

$$I_6 \cdot R_6 + I_8 \cdot R_8 + I_4 \cdot R_4 = E; \quad 2 \cdot 1 + 1 \cdot 6 + \frac{1}{2} \cdot 4 = 10 \text{ В}$$

$$I_5 \cdot R_5 + I_3 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4 = 0; \quad \frac{1}{2} \cdot 2 + \frac{1}{3} \cdot 3 - \frac{1}{2} \cdot 4 = 0 \text{ В}$$

$$I_{1,2} \cdot R_{1,2} - I_3 \cdot R_3 = 0; \quad \frac{1}{6} \cdot 6 - \frac{1}{3} \cdot 3 = 0 \text{ В}$$

Проверка токов по уравнениям контурных токов

$$\text{Контурные токи: } I_{11} = I_7; I_{22} = I_8; I_{33} = I_5; I_{44} = I_{1,2}$$

Контурные сопротивления (сумма сопротивлений по обходу контура):

$$R_{11} = R_6 + R_7 = 1 + 8 = 9 \text{ Ом}; R_{22} = R_6 + R_8 + R_4 = 1 + 6 + 4 = 11 \text{ Ом};$$

$$R_{33} = R_3 + R_4 + R_5 = 3 + 4 + 2 = 9 \text{ Ом}; R_{44} = R_1 + R_2 + R_3 = 2 + 4 + 3 = 9 \text{ Ом}$$

Общие сопротивления контуров:

$$R_{12} = R_{21} = R_6; R_{23} = R_{32} = R_4; R_{34} = R_{43} = R_3$$

Уравнения контурных токов (контурные уравнения):

$$I_{11} \cdot R_{11} + I_{22} \cdot R_{12} = E; 1 \cdot 9 + 1 \cdot 1 = 10 \text{ В}$$

$$I_{11} \cdot R_{21} + I_{22} \cdot R_{22} - I_{33} \cdot R_{23} = E; 1 \cdot 1 + 1 \cdot 11 - \frac{1}{2} \cdot 4 = 10 \text{ В}$$

$$-I_{22} \cdot R_{32} + I_{33} \cdot R_{33} - I_{44} \cdot R_{34} = 0; -1 \cdot 4 + \frac{1}{2} \cdot 9 - \frac{1}{6} \cdot 3 = 0 \text{ В}$$

$$-I_{33} \cdot R_{43} + I_{44} \cdot R_{44} = 0; -\frac{1}{2} \cdot 3 + \frac{1}{6} \cdot 9 = 0 \text{ В}$$

Проверка тока в резисторе R_4 методом эквивалентного генератора напряжения

В примере из схемы извлекается R_4 .

$$E_{\text{Э}} = U_{1235}$$

Общее сопротивление цепи в режиме холостого хода:

$$R_{1,2,3,5,6,7,8} = \frac{(R_{1,2,3,5} + R_8) \cdot R_7}{R_{1,2,3,5} + R_8 + R_7} + R_6 = \frac{49}{9} \text{ Ом}; I_6 = \frac{E}{R_{1,2,3,5,6,7,8}} = \frac{90}{49} \text{ А};$$

$$U_{1,2,3,5,7,8} = I_6 \cdot R_{1,2,3,5,7,8} = \frac{400}{49} \text{ В}; I_8 = \frac{U_{1,2,3,5,7,8}}{R_{1,2,3,5,8}} = \frac{400/49}{10} = \frac{40}{49} \text{ А}$$

$$E_{\text{Э}} = I_8 \cdot R_{1,2,3,5} = \frac{40}{49} \cdot 4 = \frac{160}{49} \text{ В};$$

$$R_{\text{Э}} = \frac{\left(\frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7} + R_8\right) \cdot R_{1,2,3,5}}{R_6 + R_7 + R_8 + R_{1,2,3,5}} = \frac{124}{49} \text{ Ом};$$

$$I_4 = \frac{E_{\text{Э}}}{R_4 + R_3} = \frac{160/49}{4 + 124/49} = \frac{1}{2} \text{ А}$$

ТЕМА 3

АНАЛИЗ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Условие задачи

Для заданной электрической цепи:

- используя метод эквивалентных преобразований вычислить комплексные амплитуды токов в ветвях и напряжений на элементах, активную, реактивную и полную мощности цепи;

- проверить найденные токи подстановкой в систему уравнений Кирхгофа;

- построить полную векторную диаграмму токов и напряжений;

- вычислить значения индуктивности для катушек индуктивности и емкости для конденсаторов.

Методика решения

Для расчета комплексных амплитуд токов и напряжений применяется комплексная (символическая) форма их представления. Ток, напряжение и ЭДС i, u, e представляются в виде комплексных чисел. Комплексные величины отмечаются точкой сверху или подчеркиванием. Комплексно-сопряженные — звездочкой сверху.

$\dot{I}_m = I_m \cdot e^{j\alpha_i} = I_m \cos \alpha_i + jI_m \sin \alpha_i = a + jb$ - показательная, тригонометрическая и алгебраическая формы комплексного числа.

$$I_m = \sqrt{a^2 + b^2}; \alpha_i = \arctg \frac{b}{a}.$$

Аналогично записываются в комплексной форме \dot{U}_m, \dot{E}_m .

Мощность в комплексной форме

$$\tilde{S} = \frac{\dot{U}_m \cdot \dot{I}_m}{2} = \dot{U} \cdot \dot{I} = U \cdot I \cdot e^{j\varphi} = S \cdot e^{j\varphi} = S \cdot \cos \varphi + jS \cdot \sin \varphi = P + jQ,$$

где S – полная мощность (ед. измерения ВА),

P – активная мощность, рассеиваемая в активной нагрузке R (ед. измерения Вт),

Q – реактивная мощность в реактивной нагрузке L, C (ед. измерения Вар).

$\varphi = \alpha_u - \alpha_i$; $I_m^* = I_m e^{-j\alpha}$ - величина, комплексно сопряженная току I_m .

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \varphi = \operatorname{arctg} \frac{P}{Q}$$

Комплексные сопротивления:

- резистора $z_R = R$;

- катушки индуктивности $z_L = jX_L = j\omega L = j2\pi fL$;

- конденсатора $z_c = -jX_c = -j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{1}{2\pi fC}$.

На векторных диаграммах токи, напряжения и ЭДС представляются в виде векторов, длина которых равна модулям этих величин, а угловое положение определяется их начальными фазами. Следует также учитывать, что напряжение на катушке индуктивности опережает протекающий через нее ток на 90° т.к. $U_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \sin(\omega t + \alpha_i + \frac{\pi}{2})$, а напряжение на конденсаторе отстает от протекающего через него тока на 90° , так как.

$$U_c = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t + \alpha_i - \frac{\pi}{2}).$$

Пример решения задачи

Задана схема электрической цепи, представленная на рис. 3.1.

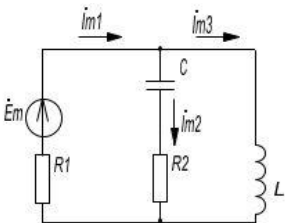


Рис. 3.1. Схема заданной цепи переменного тока с активными и реактивными элементами

На этой схеме: $\dot{E}_m = 20e^{j45^\circ} = 14,1 + j14,1$; $R_1 = 2$, $R_2 = 4$, $X_L = 5$, $X_C = 3$ (Ом); $f = 10\text{кГц}$

Определение комплексных амплитуд токов и напряжений методом эквивалентных преобразований (свертывания)

Преобразуем схему рис. 3.1, переходя к комплексным сопротивлениям (рис. 3.2.).

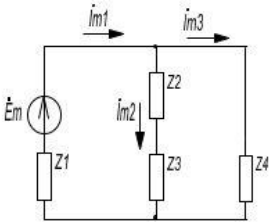


Рис. 3.2. Схема заданной цепи с комплексными сопротивлениями

Схемы эквивалентных преобразований цепи приведены на рис. 3.3.

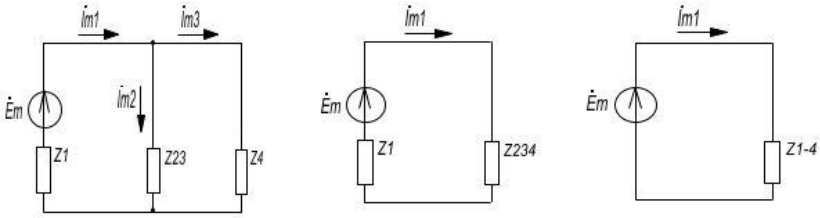


Рис. 3.3. Преобразования цепи

$$\dot{I}_{m1} = \frac{\dot{E}_m}{z_{1-4}} = \frac{20e^{j45^\circ}}{7,43e^{j19,6^\circ}} = 2,69e^{j25,4^\circ} = 2,42 + j1,15$$

$$\dot{U}_{m2,3,4} = \dot{I}_{m1} \cdot z_{2,3,4} = 2,69e^{j25,4^\circ} \cdot 5,59e^{j26,5^\circ} = 15,09e^{j51,9^\circ} = 9,31 + j11,87$$

$$\dot{I}_{m2} = \frac{U_{m2,3,4}}{z_{2,3}} = \frac{15,09e^{j51,9^\circ}}{5e^{-j36,87^\circ}} = 3e^{j88,8^\circ} = 0,06 + j2,99$$

$$\dot{I}_{m3} = \frac{\dot{U}_{m2,3,4}}{z_4} = \frac{15,09e^{j51,9^\circ}}{5e^{j90^\circ}} = 3e^{-j38,1} = 2,36 - j1,85$$

МОЩНОСТИ ЦЕПИ

$$\tilde{S} = \frac{\dot{E}_m \cdot \dot{I}_{m1}^*}{2} = \frac{20e^{j45^\circ} \cdot 2,69e^{-j25,4^\circ}}{2} = 26,9e^{j19,6^\circ} = 25,34 + j9,02$$

$$S = 26,9 \text{ ВА}; P = 25,34 \text{ Вт}; Q = 9,02 \text{ Вар}; \varphi = 19,6^\circ$$

Проверка токов подстановкой в уравнения Кирхгофа

$$\dot{I}_{m1} - \dot{I}_{m2} - \dot{I}_{m3} = 0; \quad 2,42 + j1,15 - 0,06 - j2,99 - 2,36 + j1,85 \approx 0$$

$$\dot{I}_{m3} \cdot z_4 - \dot{I}_{m2} \cdot z_3 - \dot{I}_{m2} \cdot z_2 = 0; \quad j11,8 + 9,25 - 0,24 - j12 + j0,18 - 9 \approx 0$$

$$\dot{I}_{m1} \cdot z_1 + \dot{I}_{m2} \cdot z_2 + \dot{I}_{m2} \cdot z_3 = \dot{E}_m; \quad 4,84 + j2,3 - j0,18 + 9 + 0,24 + j12 \approx 14,1 + j14,1$$

Построение векторной диаграммы токов и напряжений

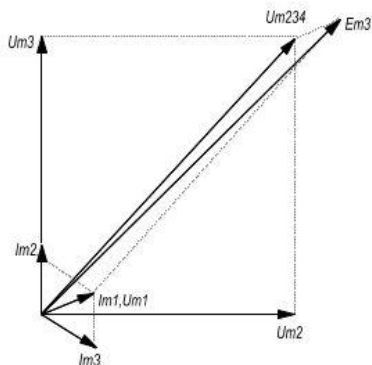


Рис. 3.4. Векторная диаграмма токов и напряжений цепи

Расчет индуктивности катушки и емкости конденсатора

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{5}{2\pi \cdot 10^4} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} = 80 \text{ мкГн}; \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^4 \cdot 3} = 53 \cdot 10^{-7} \text{ Ф} = 5,3 \text{ мкФ}$$

ТЕМА 4

АНАЛИЗ ОДИНОЧНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

Условие задачи

На заданный последовательный или параллельный одиночный RLC -контур подается, соответственно, синусоидальное напряжение или ток с постоянной амплитудой. Нужно вычислить указанные характеристики и параметры контура при приведенных значениях исходных данных.

Методика решения

На частоте резонанса f_0 ($\omega_0 = 2\pi f_0$) сопротивления катушки индуктивности и конденсатора равны $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \rho$, ($x_{oL} = x_{oC} = \rho$), где величина $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ называется характеристическим сопротивлением контура. Величина $Q = \frac{\rho}{R}$ называется

добротностью контура. Она определяет его избирательность — полосу пропускания $\Delta f = \frac{f_0}{Q}$.

Для последовательного контура предполагается, что напряжение на нем $U = \text{const}$ (идеальный источник напряжения).

При резонансе напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе равны:

$$U_{L_0} = U_{C_0} = I_0 \rho = \frac{U}{R} \rho = UQ,$$

где $I_0 = \frac{U}{R}$ - ток контура при резонансе.

На частоте, отличающейся от резонансной $f \neq f_0$, модуль сопротивления контура $Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} = R\sqrt{1 + \zeta^2}$, где величина $\zeta = \frac{x_L - x_C}{R}$ называется обобщенной расстройкой. При резонансе входное сопротивление контура минимально $Z_0 = R$, а входная проводимость $Y_0 = \frac{1}{Z_0}$ максимальна.

Зависимость $Y(f) = \frac{1}{Z(f)}$ — амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

входной проводимости контура. По АЧХ, на уровне $\frac{Y_0}{\sqrt{2}} \approx 0,707Y_0$, можно определить полосу пропускания контура Δf . Зависимость тока контура от частоты $I = \frac{U}{Z}$ совпадает по форме с АЧХ входной проводимости. Кроме приведенных выше формул для расчетов также можно использовать соотношения:

$$x_L = 2\pi fL = \rho \frac{f}{f_0}, \quad x_C = \frac{1}{2\pi fC} = \rho \frac{f_0}{f}, \quad U_L = Ix_L, \quad U_C = Ix_C, \quad \frac{U_L}{U_C} = \frac{f^2}{f_0^2}$$

Для параллельного контура предполагается, что ток, поступающий в него из источника $I = \text{const}$ (идеальный источник тока).

При резонансе, когда $f = f_0$, токи в ветвях катушки индуктивности и конденсатора равны $I_{L_0} = I_{C_0} = IQ$. Входное сопротивление параллельного контура

при резонансе максимально $Z_0 = \frac{L}{CR} = \frac{\rho^2}{R} = \rho Q$. Падение напряжения на контуре при резонансе $U_0 = IZ_0$.

На частоте, отличающейся от резонансной ($f \neq f_0$), сопротивление контура $Z = U_0 / \sqrt{1 + \xi^2}$. Зависимость $Z(f)$ – АЧХ входного сопротивления параллельного контура. При этом напряжение на контуре

$$U = \frac{U_0}{\sqrt{1 + \xi^2}}$$

Совпадает по форме с АЧХ входного сопротивления контура.

Примеры решения задач

Анализ последовательного контура. Схема (рис.4.1)

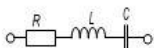


Рис. 4.1. Последовательный колебательный контур

Дано: $L=20$ мкГн; $R=5$ Ом; $f=10$ МГц; $\rho=400$ Ом; $I=10$ мА

Вычислить: C (пФ); U_{L0} , U_{C0} (В); Q ; Δf (кГц); U (В); I_0 (А)

Решение

- Добротность контура

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{400}{5} = 80$$

- Емкость конденсатора

$$C = \frac{L}{\rho^2} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{16 \cdot 10^4} = 125 \text{ пФ}$$

- Частота резонанса

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 10^{-6} \cdot 125 \cdot 10^{-12}}} = 20 \text{ МГц}$$

- Модуль сопротивления контура на частоте 10 МГц

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2} = \sqrt{5^2 + \left(2 \cdot \pi \cdot 10^7 \cdot 20 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10^7 \cdot 125 \cdot 10^{-12}}\right)^2} = 14 \text{ Ом}$$

- Напряжение на контуре

$$U = I \cdot Z = 10^{-2} \cdot 14 = 140 \text{ мВ}$$

- Ток контура при резонансе

$$I_0 = \frac{U}{R} = \frac{140}{5} = 28 \text{ мА}$$

- Напряжение на катушке индуктивности и конденсаторе при резонансе

$$U_{L0} = U_{C0} = I_0 \cdot \rho = 28 \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 11,2 \text{ В}$$

- Полоса пропускания контура

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q} = \frac{20 \cdot 10^6}{80} = 250 \text{ кГц}$$

Ответ:

$$C = 125 \text{ пФ}; U_{L0} = U_{C0} = 11,2 \text{ В}; Q = 80; \Delta f = 250 \text{ кГц}; U = 140 \text{ мВ}; I_0 = 28 \text{ мА}$$

Анализ параллельного контура. Схема (рис. 4.2)

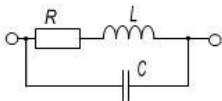


Рис. 4.2. Параллельный колебательный контур

Дано: $f_0 = 2 \text{ МГц}$; $f = 3 \text{ МГц}$; $Q = 100$; $I_{L0} = I_{C0} = 120 \text{ мА}$; $U_0 = 30 \text{ В}$

Вычислить: R (Ом); I (мА); ρ (Ом); Δf (кГц); Z_0 (кОм); Z (кОм) U (В)

Решение

- Входной ток контура

$$I = \frac{I_{L0}}{Q} = \frac{I_{C0}}{Q} = \frac{120 \cdot 10^{-3}}{100} = 1,2 \text{ мА}$$

- Сопротивление контура при резонансе

$$Z_0 = \frac{U_0}{I} = \frac{30}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 25 \text{ кОм}$$

- Характеристическое сопротивление контура

$$\rho = \frac{Z_0}{Q} = \frac{25 \cdot 10^3}{100} = 250 \text{ Ом}$$

- Сопротивление потерь контура

$$R = \frac{\rho}{Q} = \frac{250}{100} = 2,5 \text{ Ом}$$

- Полоса пропускания контура

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q} = \frac{2 \cdot 10^6}{100} = 20 \text{ кГц}$$

- Индуктивность катушки

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{250}{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^6} = 20 \text{ мкГн}$$

- Емкость конденсатора

$$C = \frac{1}{\omega_0 \rho} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 250} = 318 \text{ пФ}$$

- Модуль сопротивления контура на частоте 3 МГц

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot L - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}\right)^2} = \sqrt{2,5^2 + \left(2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 318 \cdot 10^{-12}}\right)^2} = 210 \text{ Ом}$$

- Напряжение на контуре на частоте 3 МГц

$$U = I \cdot Z = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 210 = 0,25 \text{ В}$$

Ответ: $R = 2,5 \text{ Ом}$; $I = 1,2 \text{ мА}$; $\rho = 250 \text{ Ом}$; $\Delta f = 20 \text{ кГц}$; $Z_0 = 25 \text{ кОм}$; $Z = 210 \text{ Ом}$; $U = 0,25 \text{ В}$

ТЕМА 5

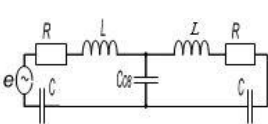
АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ДВУХ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ

Условие задачи

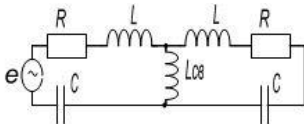
Для заданной системы двух связанных контуров определить указанные характеристики и параметры при приведенных значениях исходных данных. По вычисленным параметрам построить АЧХ контура.

Расчеты выполняются для системы связанных контуров с заданным видом связи — емкостной, индуктивной или трансформаторной (рис. 5.1).

а)



б)



в)

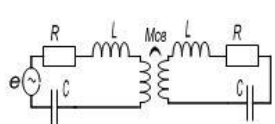


Рис. 5.1. Системы связанных контуров: а) с емкостной связью, б) с индуктивной связью, в) с трансформаторной связью

Параметры элементов контуров R, L, C одинаковые.

Общий вид нормированной амплитудно-частотной характеристики представлен на рис. 5.2.

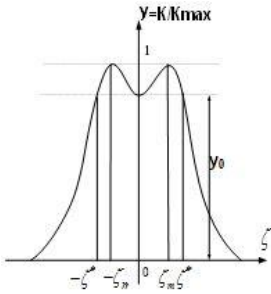


Рис. 5.2. Нормированная АЧХ системы двух связанных колебательных контуров

В задаче эта АЧХ строится по вычисленным значениям y_0, ξ_m, ξ^* .

Методика решения

Формулы для расчёта.

- Частота резонанса:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

где емкость конденсатора C определяется по эмпирической формуле:

$C, \text{пФ} \approx 0,5 \lambda_0 \text{ (см)}, \lambda_0 = c / f_0$ – длина волны, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

- Фактор связи:

$$A = \frac{1}{y_0} + \sqrt{\frac{1}{y_0^2} - 1} \quad \text{или} \quad A = \sqrt{\xi_m^2 + 1}, \quad \text{где обобщенная расстройка } \xi_m = 2L \frac{\omega_m - \omega_0}{R}$$

- Сопротивление потерь: $R = \frac{L}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2\omega^*}{\sqrt{A^2 - 1}}$

- Обобщенная расстройка $\xi^* = \sqrt{2(A^2 - 1)}$

- Сопротивление связи $X_{св} = A \cdot R$,

Где, в зависимости от вида связи $X_{св} = \omega_0 L_{св} \cdot \frac{1}{\omega_0 C_{св}}, \omega_0 M_{св}$.

- Максимальное значение коэффициента полезного действия системы двух связанных контуров $\eta_{\max} = \frac{A^2}{A^2 + 1}$

Пример решения задачи

Дано: $f_0=2$ МГц; $y_0=0,7$; $2\Delta f^* = 4$ кГц, где $\Delta f^* = f^* - f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; λ_0 ; $M_{св}$; f_m ; η_m ; построить $y(\xi)$

Схема на рис. 5.1-в.

Решение

- Длина волны при резонансе

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^6} = 150 \text{ м}$$

- Фактор связи

$$A = \frac{1}{y_0} + \sqrt{\frac{1}{y_0^2} - 1} = \frac{1}{0,7} + \sqrt{\frac{1}{0,7^2} - 1} = 2,45$$

- Обобщенная расстройка на уровне y_0

$$\xi^* = \sqrt{2(A^2 - 1)} = \sqrt{2(2,45^2 - 1)} = 3,16$$

- Емкость конденсаторов

$$C, \text{ пФ} \approx 0,5 \lambda_0, \text{ см} = 0,5 \cdot 150 = 75 \text{ пФ}$$

- Индуктивность катушек

$$L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 \cdot C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 2 \cdot 10^6)^2 \cdot 75 \cdot 10^{-12}} = 84 \text{ мкГн}$$

- Частота расстройки на уровне y_0

$$f^* = f_0 + \Delta f^* = 2 \cdot 10^6 + 2 \cdot 10^3 = 2002 \text{ кГц}$$

- Сопротивление потерь

$$R = \frac{L}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2\omega^*}{\sqrt{A^2 - 1}} = \frac{L}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f^*}{\sqrt{A^2 - 1}} = \frac{84 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 2002}{\sqrt{2,45^2 - 1}} = 0,7 \text{ Ом}$$

- Характеристическое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{84 \cdot 10^{-6}}{75 \cdot 10^{-12}}} = 1058 \text{ Ом}$$

- Добротность контура

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{1058}{8,44} = 125$$

- Обобщенная расстройка при максимумах АЧХ

$$\xi_m = \sqrt{A^2 - 1} = \sqrt{2,45^2 - 1} = 2,24$$

- Частота максимумов АЧХ

$$f_m = \frac{\zeta_m \cdot R}{2L \cdot 2\pi} + f_0 = \frac{2,24 \cdot 0,7}{2 \cdot 84 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi} + 2 \cdot 10^6 = 2,0015 \text{ МГц}$$

- Сопротивление связи

$$X_{св} = A \cdot R = 2,45 \cdot 0,7 = 1,7 \text{ Ом}$$

- Взаимная индуктивность связи

$$M_{св} = \frac{X_{св}}{2\pi f_0} = \frac{1,7}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^6} = 0,14 \text{ мкГн}$$

- Максимальное значение КПД

$$\eta_{\max} = \frac{A^2}{A^2 + 1} = \frac{2,45^2}{2,45^2 + 1} = 0,94$$

Ответ: $R = 8,44 \text{ Ом}$; $L = 84 \text{ мкГн}$; $C = 75 \text{ пФ}$; $\rho = 1058 \text{ Ом}$; $Q = 125$; $\lambda_0 = 150 \text{ Ом}$;

$M_{св} = 0,14 \text{ мкГн}$; $f_m = 2,0015 \text{ МГц}$; $\eta_{\max} = 0,94$ η_m .

Данные для построения АЧХ системы связанных контуров (рис.5.2):

$\zeta_m = 2,24$; $\zeta^* = 3,16$; $f_0 = 2 \text{ МГц}$; $y_0 = 0,7$

ТЕМА 6

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Условие задачи

Для заданной схемы четырехполосника вывести формулы амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик и построить графики этих функций.

Методика решения

Выводится комплексная передаточная функция напряжения для заданной электрической цепи в экспоненциальной форме.

$$K_u(j\omega) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = K_u(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad \omega = 2\pi f$$

$\underline{U}_{\text{вх}}, \underline{U}_{\text{вых}}$ — комплексные амплитуды входного и выходного напряжений четырехполюсника.

Строятся в логарифмическом масштабе по оси частот графики АЧХ — нормированного модуля передаточной функции $K_u(f) / K_{u\text{max}}(f)$ и ФЧХ.

Графики строятся в EXCEL.

Пример решения задачи

Исходные данные:

Схема (рис. 6.1)

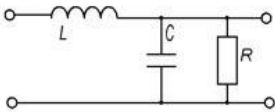


Рис. 6.1. Схема четырехполюсника $L = 5$ мГн, $C = 10$ мкФ, $R = 60$ Ом

Решение

Комплексный коэффициент передачи напряжения (передаточная функция)

$$K_u(j\omega) = \frac{R \frac{1}{j\omega C} / (R + \frac{1}{j\omega C})}{j\omega L + R \frac{1}{j\omega C} / (R + \frac{1}{j\omega C})} = A + jB, \text{ где } K_u(\omega) = \sqrt{A^2 + B^2}, \phi(\omega) = \arctg\left(\frac{B}{A}\right)$$

Или

$$K_u(j\omega) = \frac{R}{R + j\omega L - RLC\omega^2} = \frac{R}{(R^2(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega L)^2)^{1/2}} e^{-j \arctg\left(\frac{\omega L}{R(1 - LC\omega^2)}\right)}, \omega = 2\pi f$$

Графики АЧХ и ФЧХ, построенные в EXCEL (рис. 6.2)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	f	Ku													
2	1	1,000002													
3	10	1,000184													
4	100	1,018665													
5	1000	0,905912													
6	10000	0,005095													
7	100000	5,07E-05													
8	1000000	5,07E-07													
9															
10		Ku/Kumax													
11	1	1													
12	10	1,000182													
13	100	1,018663													
14	1000	0,905911													
15	10000	0,005095													
16	100000	5,07E-05													
17	1000000	5,07E-07													
18															
19		φ													
20	1	-0,03													
21	10	-0,30006													
22	100	-3,05745													
23	1000	28,31474													
24	10000	1,528752													
25	100000	0,152143													
26	1000000	0,015214													

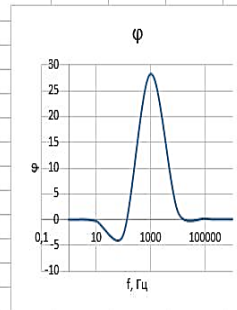
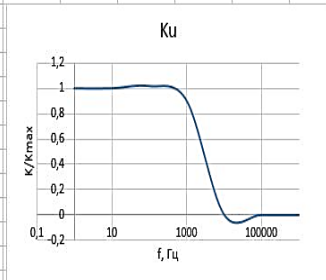


Рис. 6.2. Графики частотных характеристик

ТЕМА 7

АНАЛИЗ РЕАКЦИИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА НА ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Условие задачи

На вход четырехполосника, схема и параметры которого указаны в варианте задания 6 с тем же номером, подается напряжение периодического сигнала сложной формы, представленное в исходных данных задания 7 временной диаграммой и описываемым ее аналитически рядом Фурье. Требуется, используя выведенные в задании 6 формулы для АЧХ и ФЧХ четырехполосника, определить ряд Фурье, описывающий напряжение на выходе, и построить в EXCEL временные диаграммы входного и выходного напряжений, складывая три или четыре, первые гармоники, в зависимости от скорости убывания их амплитуд. Объяснить причины отличия формы входного и выходного напряжений.

Методика решения

Амплитуда каждой гармоники ряда Фурье, описывающего выходное напряжение равна произведению амплитуды гармоники входного напряжения с тем же номером на модуль передаточной функции (значение АЧХ) на ее частоте.

Начальная фаза гармоники выходного напряжения равна сумме начальной фазы гармоники входного напряжения с той же частотой и фазового сдвига, вносимого на этой частоте четырехполюсником (значения ФЧХ)

Графики строятся в EXCEL.

Пример решения задачи

Исходные данные:

Данные и результаты примера решения задачи задания 6, и функция входного напряжения, заданная в виде ряда Фурье и временной диаграммы (рис. 7.1).

$$u(t) = \frac{U}{2} - \frac{U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi}{n} \sin n\Omega t$$

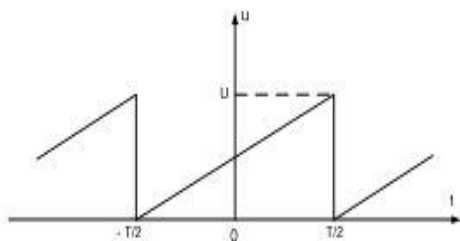


Рис. 7.1. Временная диаграмма входного напряжения

Амплитуда и период повторения импульсов входного напряжения $U = 10$ В,
 $T = 1$ мс

Решение

Так как амплитуды гармоник с ростом частоты уменьшаются медленно, временные диаграммы входного и выходного напряжений строятся по четырем первым гармоникам.

При этом, для определения амплитуд и начальных фаз выходного напряжения, вычисляются значения АЧХ и ФЧХ (k_u, φ) четырехполюсника на частотах $\Omega, 2\Omega, 3\Omega, 4\Omega$ (рис. 7.2. слева).

$$\text{Угловая частота } \Omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f.$$

Справа на рис. 7.2 показаны временные диаграммы выходного сверху и входного под ним напряжений.

График входного напряжения построен по формуле

$$u_{\text{вх}} = \frac{10}{2} + \frac{10}{\pi} \sin(\Omega t) - \frac{10}{2\pi} \sin(2\Omega t) + \frac{10}{3\pi} \sin(3\Omega t) - \frac{10}{4\pi} \sin(4\Omega t)$$

Расчеты приведены в столбцах: H — масштабные коэффициенты отсчетов фазового угла синусоиды (для первой гармоники $0,5\pi - 3\pi$ с шагом $0,1\pi$):

I — значение амплитуды гармоники.

График выходного напряжения построен в том же масштабе по формуле

$$u_{\text{вых}} = \frac{10}{2} + \frac{10}{\pi} k(\Omega) \sin(\Omega t - \varphi(\Omega)) - \frac{10}{2\pi} k(2\Omega) \sin(2\Omega t - \varphi(2\Omega)) + \frac{10}{3\pi} k(3\Omega) \sin(3\Omega t - \varphi(3\Omega)) - \frac{10}{4\pi} k(4\Omega) \sin(4\Omega t - \varphi(4\Omega))$$

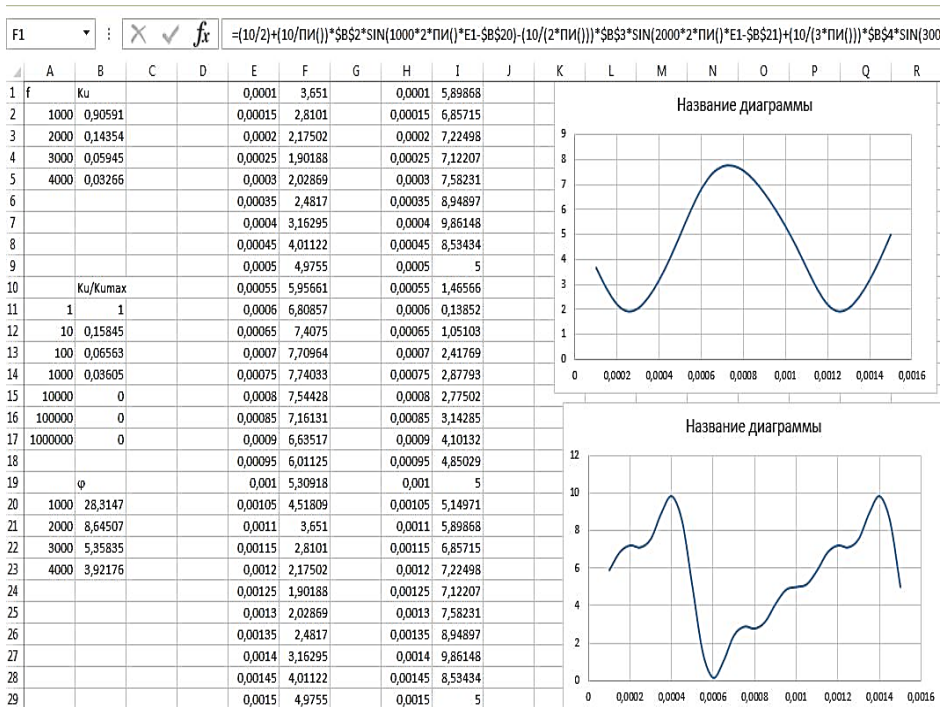


Рис. 7.2. Временные диаграммы входного и выходного напряжений

Из этих временных диаграмм и графиков АЧХ и ФЧХ следует, что заданный четырехполосник, представляющий собой фильтр низких частот, подавляет высшие гармоники и сдвигает сигнал примерно на 30^0 в сторону запаздывания.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

Состав лабораторного оборудования и учебно-методических материалов

В состав лабораторного оборудования по дисциплине «Электротехника (ТЭЦ)» входят стенды с макетами лабораторных работ, размещенные на лабораторных столах, соединительные проводники и комплект измерительных приборов: генератор стандартных сигналов, двухлучевой осциллограф и мультиметры.

Описания лабораторных работ, необходимые теоретические сведения и инструкции по выполнению работ содержатся в настоящем практикуме и пособиях, выдаваемых в лаборатории.

Порядок выполнения лабораторных работ

Лабораторные работы выполняются согласно инструкциям. Необходимые для их выполнения исходные данные и консультации можно получить у преподавателя. Работы выполняются бригадами численностью до трех человек. Одинаковый состав работ, размещенных на стендах позволяет реализовать фронтальный цикл лабораторных занятий, при котором все бригады выполняют одновременно одинаковые лабораторные работы, что позволяет согласовать их по времени с лекциями.

Перед выполнением лабораторных работ студенты должны ознакомиться с их описаниями, а также с техническими описаниями и инструкциями по эксплуатации измерительного оборудования. Приобрести необходимые навыки

работы с измерительными приборами и получить от преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы.

По окончании лабораторного занятия преподавателю представляется черновик с результатами измерений для регистрации и проверки полученных данных.

Техника безопасности при выполнении лабораторных работ

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать правила техники безопасности в лаборатории и указания преподавателя, даваемые в первичном инструктаже и в ходе выполнения работ. Студентам нельзя самостоятельно подключать лабораторное оборудование к розеткам силовой сети и отключать его. При работе с лабораторным оборудованием нельзя брать двумя руками за корпуса разных приборов и проводящие ток конструкции, так как при этом в случае нарушения контура защитного заземления и неисправности оборудования возможно поражение током. Лабораторные макеты при экспериментальных исследованиях во избежание порчи оборудования можно включать только после проверки преподавателем собранной схемы.

Правила оформления отчетов по выполненным лабораторным работам

Отчет должен содержать титульную страницу, форма которой, дается преподавателем. В тексте отчета нужно сначала указать цель работы, после чего в соответствии с последовательностью проведения исследований привести по каждому пункту схемы, озаглавленные таблицы с результатами измерений, графики и расчеты. В конце отчета привести выводы по пунктам работы с анализом полученных результатов.

Материал отчета должен быть оформлен аккуратно, с соблюдением ГОСТ на условные графические и буквенные обозначения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗИСТОРОВ И ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Цель работы: измерение, и анализ вольтамперных характеристик (ВАХ) линейных и нелинейных резисторов и источников электроэнергии, и изучение реакций линейных и нелинейных резисторов на гармонические воздействия.

1.1. Исследование ВАХ линейного и нелинейного резисторов

1.1.1. Теоретические сведения

Зависимость между падением напряжения на элементе электрической цепи и величиной протекающего через него тока называется его вольтамперной характеристикой (ВАХ). ВАХ линейного резистора описывается уравнением прямой, проходящей через начало координат: $u = Ri$. ВАХ нелинейного резистора соответствует нелинейная зависимость: $u = f(i)$. Примеры ВАХ линейного и нелинейного резисторов показаны на рис 1.1, а, б соответственно. Сопротивление линейного резистора постоянно и не зависит от величины протекающего через него тока. От сопротивления резистора зависит угол наклона его ВАХ $\varphi = \arctg R$.

Отношение u/i для нелинейного резистора в разных точках ВАХ отличаются, поэтому различают два вида его сопротивлений, статическое, определяемое наклоном секущей из начала координат в заданную точку ВАХ и дифференциальное, определяемое наклоном касательной к ВАХ в этой точке.

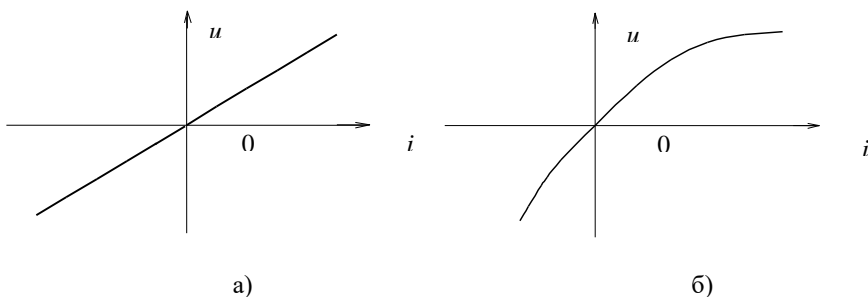


Рис. 1.1. ВАХ резисторов: а — линейного, б — нелинейного

1.1.2. Порядок проведения измерений

Соберите схему, изображенную на рис. 1.2.

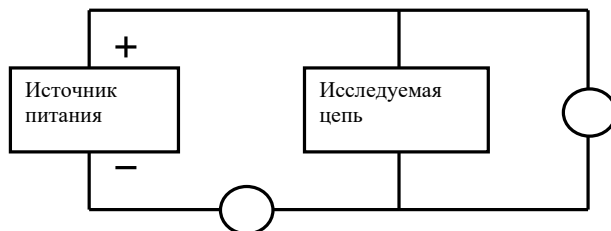


Рис. 1.2. Схема измерения ВАХ резисторов

Подключите, в качестве исследуемого, линейный резистор, указанный преподавателем. Изменяя напряжение источника через 1 В в диапазоне от -3 до 3 В, снимите показания амперметра A и вольтметра V . Данные занесите в таблицу, приведенную ниже. Постройте ВАХ и определите по графику значение R .

Таблица 1.1.

$U, \text{В}$							
$I, \text{мА}$							

Аналогично снимите ВАХ нелинейного резистора, изменяя напряжение источника питания через 0,5 В в диапазоне от -3 до 2 В. Для изменения полярности напряжения источника питания и измерительных приборов нужно поменять местами соединительные проводники на их клеммах. Постройте ВАХ нелинейного резистора и определите его внутреннее статическое и дифференциальное сопротивления при напряжении 1 В.

1.2. Исследование зависимостей между токами и напряжениями на линейном и нелинейном резисторах при гармоническом воздействии

1.2.1. Теоретические сведения

Ток в линейном резисторе в соответствии с законом Ома при любой форме напряжения прямо пропорционален ему с коэффициентом пропорциональности равным проводимости этого резистора. При этом форма тока и напряжения совпадают.

Для нелинейного резистора формулой закона Ома воспользоваться нельзя. Зависимость между напряжением и током для него в каждой точке ВАХ может быть описана лишь приближенно, например, степенным рядом:

$$i = a_1u + a_2u^2 + \dots + a_nu^n + \dots$$

При гармоническом (синусоидальном) воздействии $u = U_m \sin(\omega t + \alpha_0)$ при возведении напряжения в степень в сумме кроме слагаемого с частотой ω – первой гармоники, появляются слагаемые с частотами кратными частоте ω — высшие гармоники. Поэтому форма тока отличается от формы напряжения.

Пример такого преобразования показан стрелками на рис. 1.3.

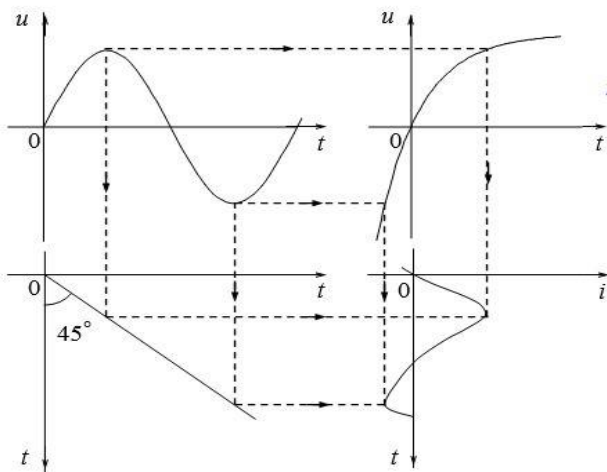


Рис. 1.3. Ток в нелинейном резисторе при синусоидальном напряжении на нем

1.2.2. Порядок проведения измерений

Соберите схему, изображенную на рис. 1.4.

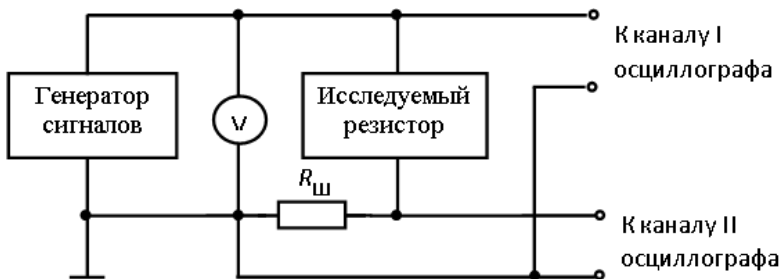


Рис. 1.4. Схема для исследования реакции линейного и нелинейного резисторов на гармоническое воздействие

Снимите осциллограммы тока и напряжения линейного и нелинейного резисторов при амплитуде синусоидального напряжения 2 В на частоте 1 кГц. Сфотографируйте их для отчета.

Используя ВАХ нелинейного резистора, полученную в разделе 1.1.2, определите графически форму тока, применяя методику, показанную на рис. 1.3 и сравните с осциллограммой.

1.3. Исследование ВАХ источников

1.3.1. Теоретические сведения

На рис.1.5 — а и 1.5 — б показан вид ВАХ идеальных — сплошная линия и реальных — пунктирная линия источников напряжения и тока.

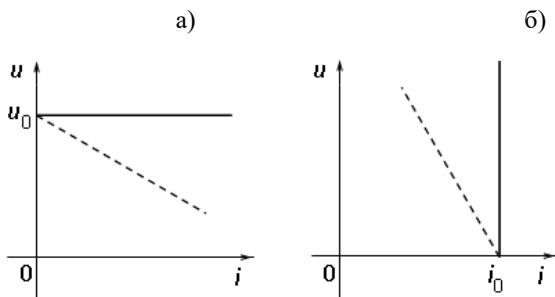


Рис. 1.5. ВАХ источников напряжения — а и тока — б

Идеальные источники не имеют внутренних потерь, их мощность не ограничена. У реального же источника напряжения всегда есть внутреннее сопротивление, а у реального источника тока внутренняя проводимость и их мощность не бесконечна. Часть вырабатываемой электроэнергии в соответствии с такой моделью теряется в источнике. Поэтому ВАХ реальных источников (внешние характеристики) имеют наклон.

1.3.2. Порядок проведения измерений

Соберите схему, изображенную на рис.1.6.

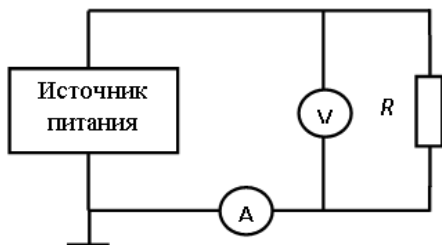


Рис. 1.6. Схема для измерения ВАХ источника электропитания и генератора сигналов

Символом R на схеме обозначен набор переключаемых резисторов с сопротивлениями от 20 Ом до 200 Ом

Для измерения ВАХ источника электропитания установите для него ограничение по напряжению 1В и ограничение по току 0,01А. Изменяя многополюсным переключателем величину сопротивления R от 200 до 20 Ом, через 20 Ом, измерьте токи и напряжения и занесите результаты в таблицу 1.2. Постройте ВАХ источника.

Таблица 1.2.

R										
$U, В$										
$I, мА$										

Чтобы измерить ВАХ генератора сигналов в схеме, приведенной на рис. 1.6, вместо источника постоянного напряжения подключите генератор сигналов. Установите на панели генератора синусоидальную форму выходного сигнала, частоту 1 кГц и действующее значение напряжения равным 1 В.

Переключатель сопротивлений R установите в положение 200 Ом и, изменяя величину R от 200 Ом до 20 Ом через 60 Ом, измерьте токи и напряжения. Результаты занесите в таблицу 1.2. Постройте ВАХ для генератора сигналов.

По ВАХ определите внутренние сопротивления источника питания и генератора сигналов.

1.4. Вопросы для самопроверки

- 1) Чем определяется угол наклона ВАХ линейного резистора?
- 2) Как определить сопротивление линейного резистора по его ВАХ?
- 3) Как определить статическое и дифференциальное сопротивления нелинейного резистора в заданной точке ВАХ?
- 4) Почему осциллограммы тока, протекающего через нелинейный резистор, и напряжения на нем отличаются по форме?
- 5) Чем отличаются ВАХ идеальных и реальных источников напряжения и тока и почему?
- 6) Как определить внутреннее сопротивление источника напряжения по его ВАХ?
- 7) Как определить проводимость источника тока по его ВАХ?

РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы: экспериментальное исследование связи между видом свободных процессов и расположением собственных частот электрических цепей на комплексной плоскости, оценка собственных частот и добротности RLC -контура по осциллограммам.

2.1. Исследование свободного процесса в цепи первого порядка

2.1.1. Теоретические сведения

В свободном режиме источники отключены от цепи и происходит рассеивание энергии, накопленной в реактивных элементах. Исследуемая цепь

(рис. 2.1) возбуждается короткими импульсами тока $i_0(t)$, заряжающими емкость C в паузах между которыми емкость разряжается и цепь находится в свободном режиме.

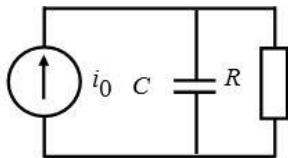


Рис. 2.1. Электрическая цепь первого порядка

Свободный процесс в цепи с одним реактивным элементом описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка, представляющим собой уравнение второго закона Кирхгофа для контура RC $u_c + u_R = 0$

$$u_c + RC \frac{du_c}{dt} = 0$$

Решение этого уравнения относительно напряжения на конденсаторе

$$u_c(t) = Ae^{-\alpha t} = Ae^{-t/\tau},$$

Где $\alpha = RC$ – постоянная затухания, а $\tau = 1/\alpha$ – постоянная времени RC -цепи.

Корень p характеристического уравнения $RCpu_c + u_c = 0$ $p = -\frac{1}{RC} = -\alpha$ называется собственной частотой RC -цепи и соответствует нулю операторной проводимости параллельной RC -цепи.

$$Y(p) = pC + \frac{1}{R} = 0$$

Постоянная интегрирования A определяется начальными условиями и равна напряжению на конденсаторе в начальный момент времени переходного процесса. Таким образом, переходный процесс в цепях первого порядка с одним энергоемким элементом аperiodический и описывается экспоненциальной зависимостью.

На рис. 2.2 приведен типовой вид переходного процесса в цепи первого порядка и показано как можно определить по осциллограмме постоянную затухания.

$$\alpha = 1/\tau = \ln(u_1/u_2)/\Delta t, \text{ где } \Delta t = t_2 - t_1$$

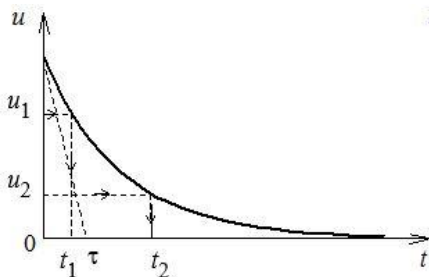


Рис. 2.2. Переходный процесс первого порядка

Постоянную времени RC-цепи можно также определить, проведя касательную к экспоненте от начала переходного процесса к оси времени, как показано на рис. 2.2.

2.1.2. Порядок проведения измерений

Соберите схему, приведенную на рис. 2.1 ($C = 0,02$ мкФ, $R = 5$ кОм). Подключите генератор импульсов, расположенный на панели лабораторного макета к генератору стандартных сигналов (ГС). Установите тип сигнала синусоидальный, напряжение на выходе ГС $U = 7 - 10$ В и его частоту $f_c = 2$ кГц.

Снимите осциллограмму напряжения на конденсаторе так, чтобы на экране был полный период повторения сигналов $T_c = 1/f_c = 0,5$ мс, и положение указателей шкал времени и напряжения на панели осциллографа. Определите по осциллограмме постоянную затухания и постоянную времени RC-цепи.

Нарисуйте комплексную плоскость и укажите на ней в масштабе положение собственной частоты RC-цепи.

2.2. Исследование свободного процесса в цепи второго порядка

2.2.1. Теоретические сведения

Схема исследуемой цепи второго порядка приведена на рис. 2.3.

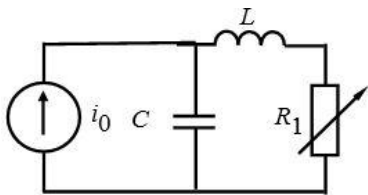


Рис. 2.3. Электрическая цепь второго порядка

Цепь представляет собой последовательный колебательный контур. Уравнение второго закона Кирхгофа для этого контура

$$u_L + u_{R_1} + u_C = 0$$

Дифференциальное уравнение, описывающее свободный процесс

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + R_1 C \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$$

Характеристическое уравнение имеет вид

$$p^2 + 2\alpha p + \omega_0^2 = 0,$$

$$\text{где: } \alpha = \frac{R_1}{2L}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Собственные частоты цепи

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

Это также соответствует нулю операторной проводимости

$$Y(p) = pC + \frac{1}{pL + R_1} = 0$$

Собственные частоты $p_{1,2}$ могут быть либо обе вещественными, либо комплексно-сопряженными. В первом случае переходный процесс аperiодический и представляет собой сумму двух экспонент. Например, на резисторе R_1

$$u_{R_1}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Временная диаграмма переходного процесса приведена на рис.2.4 сплошной линией, а экспоненты изображены пунктиром.

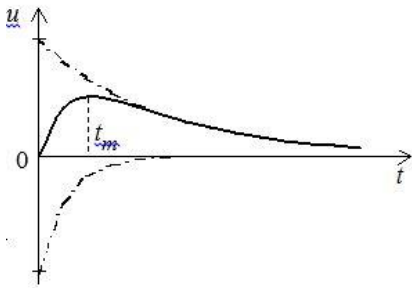


Рис. 2.4. Временная диаграмма аperiodического переходного процесса

В случае комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения свободный процесс носит колебательный характер.

$$u(t) = Ae^{-\alpha t} \cos(\omega t + \beta),$$

где α – постоянная затухания, ω – частота затухающих колебаний

$$(\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}), \beta \text{ начальная фаза.}$$

Временная диаграмма колебательного процесса представлена на рис. 2.5.

Свободный процесс при $p_1 = p_2 = -\alpha$ называется критическим и описывается выражением $u_{R1}(t) = A_1 e^{\alpha t} + A_2 t e^{\alpha t}$

Форма его временной диаграммы выглядит, как у аperiodического при этом момент достижения максимума $t_m = -1/\alpha$, если $u_{R1}(0^+) = 0$.

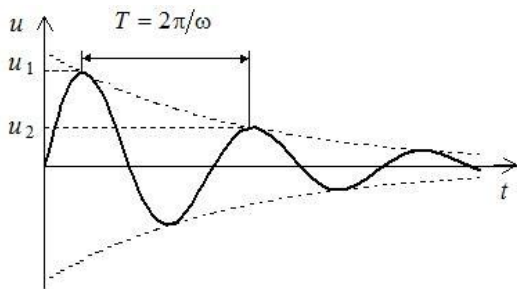


Рис. 2.5. Временная диаграмма колебательного переходного процесса

Постоянные затухания для аperiodического свободного процесса второго порядка можно определить по осциллограмме по тем же правилам, что и для процесса первого порядка, разложив ее на экспоненты.

Постоянная затухания колебательного процесса может быть определена также, но при этом должно выполняться условие $\Delta t = T = 2\pi/\omega$.

Существенный интерес представляет определение добротности Q RLC — контура по виду свободного процесса. Для последовательного RLC — контура

$$Q = \frac{\sqrt{LC}}{R} = \frac{L}{R\sqrt{LC}} = \frac{L}{R} \omega_0 = 0,5\omega_0 / \alpha,$$

Собственные частоты последовательного RLC — контура

$$p_{1,2} = -\frac{\omega_0}{2Q} \left(1 \pm \sqrt{1 - 4Q^2} \right),$$

Значению $Q < 0,5$ — соответствует аperiodический режим, значению $Q = 0,5$ — критический режим, значению $Q > 0,5$ — колебательный режим, а значению $Q = \infty$ — незатухающий колебательный режим.

При $Q > 10$ с высокой степенью точности можно считать, что

$$p_{1,2} = -\frac{\omega_0}{2Q} \pm j\omega_0.$$

Формула, позволяющая в этом случае определить добротность по осциллограмме имеет вид

$$Q = \frac{\omega_0}{2\alpha} = \frac{2\pi}{2\alpha T} = \frac{\pi}{\ln(u_1/u_2)}.$$

Для повышения точности можно брать отношение напряжений за n периодов колебаний и рассчитывать добротность по формуле

$$Q = \frac{n\pi}{\ln \frac{u(t)}{u(t+nt)}}.$$

2.2.2. Порядок проведения измерений

Соберите схему, показанную на рис. 2.3, в которой $C = 0,02$ мкФ, $L = 25$ мГн. Снимите осциллограммы напряжения на резисторе при значениях $R_1 = 0,5$ кОм

(колебательный режим) и $R_1 = 3 \text{ кОм}$ (апериодический режим). Изменяя величину R_1 , снимите осциллограмму критического режима (граничного между колебательным и апериодическим режимами) и запишите величину полученного сопротивления $R_{1\text{кр}}$.

Установите частоту $f_c = 1 \text{ кГц}$ и снимите также осциллограмму напряжения на конденсаторе при $R_1 = 0$.

Определите по осциллограммам собственные частоты в апериодическом, колебательном и критическом режимах.

Вычислите добротности контура в этих режимах и при $R_1=0$, используя заданные параметры элементов и осциллограммы.

Нанесите собственные частоты в масштабе на комплексную плоскость.

2.3. Исследование свободного процесса в цепи третьего порядка

2.3.1. Теоретические сведения

Схема исследуемой цепи третьего порядка приведена на рис. 2.6.

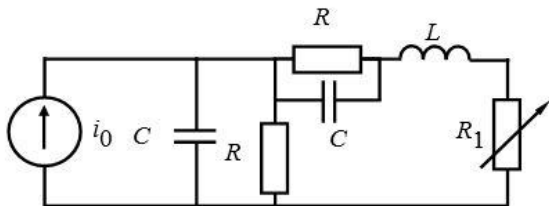


Рис. 2.6. Электрическая цепь третьего порядка
Операторная проводимость цепи

$$Y(p) = pC + \frac{1}{R} + \frac{(pC + 1/R)/(pL + R_1)}{pC + 1/R + 1/(pL + R_1)}$$

Это выражение равно нулю при трех значениях переменной p , которые равны собственным частотам цепи

$$p_1 = -\alpha_1 = -\frac{1}{RC}, \quad p_{2,3} = -\alpha_2 \pm \sqrt{\alpha_2^2 - \frac{2 + R_1/R}{LC}}, \quad \text{где } \alpha_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{R_1}{L} + \frac{1}{RC} \right),$$

Если собственные частоты p_1, p_2, p_3 все вещественные свободный процесс имеет аperiodический характер. Если одна вещественная и две комплексно-сопряженные, например, $p_1 = -\alpha_1$ и $p_{2,3} = -\alpha_2 \pm j\omega$. свободный процесс представляет собой сумму экспоненты и колебательного процесса.

Временная диаграмма свободного процесса для последнего случая представлена на рис. 2.7.

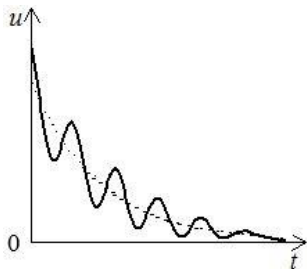


Рис. 2.7. Временная диаграмма свободного процесса третьего порядка.

Цепи первого и второго порядка и переходные процессы в них называют элементарными. Линейные цепи и процессы более высоких порядков, как следует из рис. 2.7. представляют собой суперпозицию (наложение) элементарных.

2.3.2. Порядок проведения измерений

Соберите схему, приведенную на рисунке 2.6 с параметрами элементов $C = 0,02$ мкФ, $R = 5$ кОм, $R_1 = 1$ кОм, $L = 25$ мГн. Установите частоту ГС $f_c = 2$ кГц и снимите осциллограмму напряжения на конденсаторе С.

Вычислите значения собственных частот цепи и напишите выражение, описывающее этот свободный процесс.

Нанесите собственные частоты в масштабе на комплексную плоскость.

2.4. Вопросы для самопроверки

1) Каким аналитическим выражением описываются осциллограммы свободного процесса первого порядка?

2) Как определить по осциллограмме свободного процесса первого порядка собственную частоту цепи, постоянную затухания и постоянную времени?

- 3) Какими аналитическими выражениями описываются осциллограммы аperiodического и колебательного свободных процессов в цепи второго порядка?
- 4) Как определить по осциллограммам аperiodического и колебательного свободных процессов собственные частоты цепей второго порядка?
- 5) Как определять добротность контура аналитически, зная параметры элементов, и экспериментально по осциллограммам?
- 6) Каким аналитическим выражением можно описать исследованный собственный процесс третьего порядка?
- 8) Как связан вид графика свободного процесса с положением собственных частот на комплексной плоскости?

РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ ИСТОЧНИКА ЭДЕКТРОЭНЕРГИИ

Цель работы: исследование переходных процессов в линейных цепях при воздействии ступенчатого напряжения и мгновенном изменении структуры цепи.

3.1. Исследование переходных процессов в цепи первого порядка с источником постоянного напряжения при скачкообразном изменении ее структуры

3.1.1. Теоретические сведения

Схема исследуемой цепи приведена на рис. 3.1.

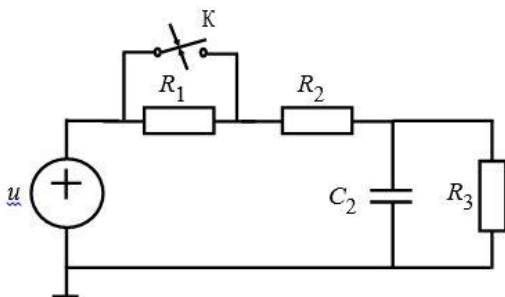


Рис. 3.1. RC-цепь первого порядка

Питание схемы осуществляется от источника постоянного напряжения. Переходные процессы, которые происходят в цепи вследствие периодического замыкания резистора R_1 электронным ключом K наблюдаются с помощью осциллографа.

Управление работой ключа производится с помощью генератора стандартных сигналов (ГС), генерирующего периодически прямоугольные импульсы напряжения. В течение первой половины периода резистор R_1 замкнут накоротко, в течение второй половины периода резистор R_1 включен в схему. Параметры элементов исследуемых цепей выбраны так, что длительность переходных процессов меньше половины периода коммутации.

Переходные процессы в цепи описываются системами линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. При этом реакция цепи, в частности напряжение на ее элементах представляет собой сумму свободной и вынужденной составляющих:

$$u(t) = u_{\text{св}}(t) + u_{\text{вын}}(t)$$

В результате каждый раз к моменту коммутации переходные процессы в этих цепях заканчиваются установившимися (рис. 3.2).

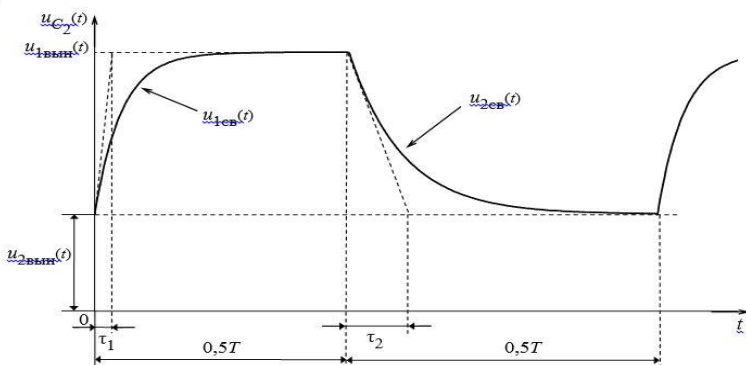


Рис. 3.2. Переходные процессы в цепи первого порядка

Вынужденная составляющая определяется напряжением на элементах в установившемся режиме. Так как ток через конденсатор при этом отсутствует, в эквивалентных схемах установившегося режима конденсатор отсутствует.

Свободная составляющая реакции определяется только параметрами исследуемых цепей и начальными условиями:

$$u_{св}(t) = Ae^{pt},$$

где A — постоянная интегрирования;

$p < 0$ — собственная частота (корень характеристического уравнения).

Собственная частота определяется выражением.

$$p_1 = -\frac{R_1 + R_2 + R_3}{C_2 R_3 (R_1 + R_2)}$$

При замкнутом ключе K сопротивление $R_1 = 0$.

3.1.2. Порядок проведения измерений

Соберите схему, приведенную на рис. 3.3 с параметрами элементов $R_1 = 2$ кОм; $R_2 = 1$ кОм; $R_3 = 4$ кОм; $C_2 = 0,05$ мкФ.

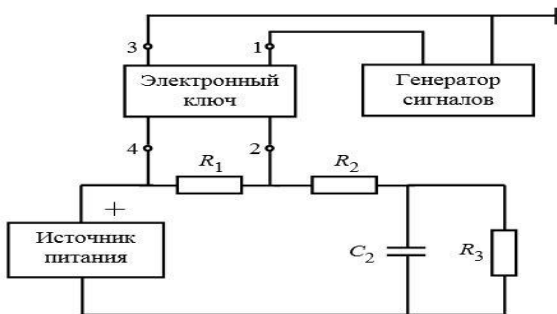


Рис. 3.3. Схема для проведения исследований

На источнике постоянного напряжения установите выходное напряжение 4В, на ГС режим генерирования прямоугольных импульсов с частотой повторения 1кГц и амплитудой 4 В.

Снимите осциллограмму напряжения на конденсаторе C_2 и измерьте вынужденные составляющие этого напряжения при замкнутом и разомкнутом состояниях электронного ключа.

Измерьте по осциллограмме установившиеся значения $u_{1\text{вын}}$, $u_{2\text{вын}}$. Рассчитайте по эквивалентным схемам установившегося режима значения $u_{1\text{вын}}$, $u_{2\text{вын}}$ и сравните их с результатами, полученными опытным путем.

По осциллограмме, свойство касательной к экспоненте, определите экспериментальные значения постоянной времени и собственную частоту исследуемой цепи при замыкании и размыкании электронного ключа и сравните их со значениями, вычисленными по приведенной выше формуле. Нарисуйте комплексную плоскость и поместите на ней в масштабе собственные частоты.

3.2. Исследование переходных процессов в цепи второго порядка с источником постоянного напряжения при скачкообразном изменении ее структуры

3.2.1. Теоретические сведения

Схема исследуемой цепи приведена на рис. 3.4.

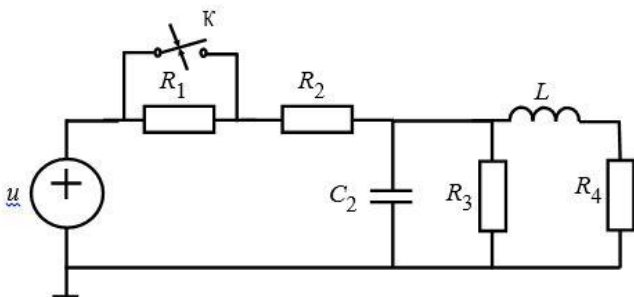


Рис. 3.4. RLC-цепь второго порядка

В установившемся режиме конденсатор в схеме отсутствует, а катушка индуктивности заменяется проводником.

В свободном режиме собственные частоты

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega = -\frac{1}{2} \left(\frac{R_1 + R_2 + R_3}{C_2 R_3 (R_1 + R_2)} + \frac{R_4}{L} \right) \pm$$

$$\pm j \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_3 R_4}{LC_2 R_3 (R_1 + R_2)} - \frac{1}{4} \left(\frac{R_1 + R_2 + R_3}{C_2 R_3 (R_1 + R_2)} + \frac{R_4}{L} \right)^2},$$

При замыкании ключа K сопротивление $R_1 = 0$.

На рис. 3.5 показан вид временной диаграммы напряжения на конденсаторе.

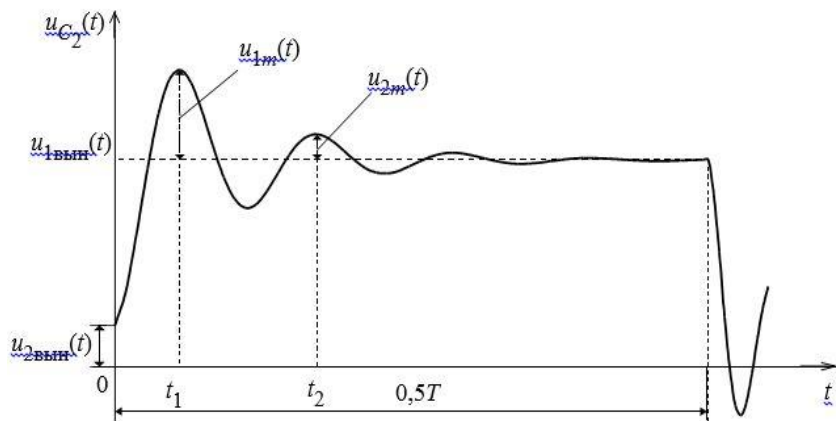


Рис. 3.5. Переходный процесс второго порядка

Паре комплексных сопряженных значений p_k соответствует синусоидальная функция затухающая по экспоненте.

Переходные процессы в исследуемой цепи имеют колебательный характер.

3.2.2. Порядок проведения измерений

Для исследования переходных процессов используется генератор стандартных сигналов ГС в режиме периодической генерации прямоугольных импульсов с частотой 0,5 кГц и амплитудой 4 В. Длительность импульсов равна половине периода их повторения. Параметры элементов выбраны так, что время затухания переходных процессов в цепях меньше длительности импульсов.

Соберите схему, приведенную на рис. 3.4 с параметрами элементов

$R_1 = 2$ кОм; $R_2 = 1$ кОм; $R_3 = 4$ кОм; $R_4 = 0,2$ кОм; $C_2 = 0,05$ мкФ; $L = 10$ мГн.

При сборке используйте ранее исследованную схему рис.3.3 подключив к ней параллельно конденсатору C_2 , последовательно соединенные катушку

индуктивности L и резистор R_4 . Снимите осциллограмму напряжения на конденсаторе и измерьте вынужденные составляющие этого напряжения при замкнутом и разомкнутом ключе; сравните их с расчетными значениями, найденными по эквивалентным схемам.

По осциллограмме определите коэффициент затухания α и частоту затухающих колебаний ω , используя масштаб времени снятых осциллограмм и следующие формулы:

$$\alpha = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{u_{1m}}{u_{2m}}; \quad \omega = \frac{2\pi}{t_2 - t_1}.$$

Значения частот собственных колебаний исследуемой цепи $p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega$, вычисленные по осциллограмме, сравните с найденными по приведенной выше формуле.

Приведите собственные частоты в масштабе на комплексной плоскости.

3.3. Исследование переходных процессов в RC — цепи второго порядка при действии источника ступенчатого напряжения

3.3.1. Теоретические сведения

Схема исследуемой цепи приведена на рис. 3.6.

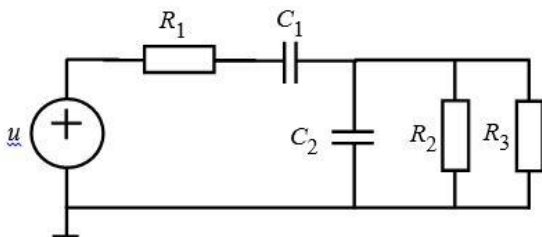


Рис. 3.6. RC -цепь второго порядка

Для исследования переходных процессов используется генератор стандартных сигналов ГС в режиме периодической генерации прямоугольных импульсов с частотой 0,5 кГц и амплитудой 4 В. Длительность импульсов равна

половине периода их повторения. Параметры элементов выбраны так, что время затухания переходных процессов в цепях меньше длительности импульсов.

Собственные частоты

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{R_1 R_{23}}{R_1 R_{23} C_2} \right) \pm \sqrt{4 \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{R_1 R_{23}}{R_1 R_{23} C_2} \right)^2 - \frac{1}{R_1 R_{23} C_1 C_2}},$$

где $R_{23} = R_2 R_3 / (R_2 + R_3)$.

3.3.2. Порядок проведения измерений

Соберите схему, приведенную на рис. 3.6. с параметрами элементов:

$R_1 = 2$ кОм; $R_2 = 1$ кОм; $R_3 = 4$ кОм; $C_1 = C_2 = 0,05$ мкФ. На панели ГС

установите режим генерации прямоугольных импульсов с частотой 0,5 кГц и амплитудой 4 В. Подключите канал I осциллографа ко входу схемы, а канал II к конденсатору C_2 . Снимите на входе цепи и конденсаторе C_2 осциллограммы напряжений с периодом повторения процессов $T = 2$ мс. Определите собственные частоты по осциллограмме и расчетной формуле, сравните их и отобразите в масштабе на комплексной плоскости.

3.4. Исследование переходных процессов в RLC – цепи третьего порядка при действии источника ступенчатого напряжения

3.4.1. Теоретические сведения

Схема исследуемой цепи приведена на рис. 3.7.

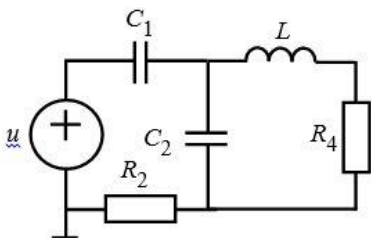


Рис. 3.7. RLC -цепь третьего порядка

Для цепи третьего порядка (рис. 3.7) собственные частоты при $C_1 R_1 = L/R_4$ и $C_1 = C_2$

$$p_1 = -\alpha_1 = \frac{1}{R_2 C_1}; p_{23} = -\alpha_2 \pm j\omega_2 = -\frac{R_4}{L} \pm j\sqrt{\frac{1}{LC_2} - \left(\frac{R_4}{L}\right)^2}.$$

При $t > 0$ переходная характеристика цепи

$$h_1(t) = h_{1\text{вын}} + A_1 e^{-\alpha_1 t} + A_2 e^{-\alpha_2 t} \cos(\omega_2 t + \alpha_3)$$

3.4.2. Порядок проведения измерений

Соберите схему, приведенную на рис. 3.7 с параметрами элементов:

$R_2 = 1$ кОм; $R_4 = 0,2$ кОм; $L = 10$ мГн; $C_1 = C_2 = 0,05$ мкФ. На панели ГС

установите режим генерации прямоугольных импульсов с частотой 0,5 кГц и амплитудой 4 В.

Снимите осциллограммы напряжения на входе цепи и резисторе R_2 .

Определите по расчетным формулам собственные частоты и покажите их в масштабе на комплексной плоскости.

3.5. Самостоятельное исследование

Для одной из схем, приведенных на рис. 3.8, заданной преподавателем, проведите исследование переходных характеристик на указанных в этом пункте элементах.

- 1) рис. 4.4, а – u_{C_2}, u_L
- 2) рис. 4.4, б – u_{C_1}, u_L
- 3) рис. 4.4, в – u_{C_2}, u_L
- 4) рис. 4.4, г – u_{C_1}, u_{R_2}
- 5) рис. 4.4, д – u_{C_2}, u_{R_1}
- 6) рис. 4.4, е – u_{C_2}, u_{R_2}
- 7) рис. 4.4, ж – u_{C_1}, u_L
- 8) рис. 4.4, з – u_{C_2}, u_L
- 9) рис. 4.4, и – u_{C_1}, u_{R_2}

При исследовании переходных процессов используйте генератор прямоугольных импульсов (ГСИ). Установите амплитуду импульсов 1 В и, изменяя частоту повторения импульсов в диапазоне от 0,5 кГц до 2 кГц, найдите такую частоту, при которой обеспечивается затухание переходных процессов за время наблюдения.

По снятым осциллограммам реакций определите частоты собственных колебаний цепи, начальные и вынужденные значения переходных характеристик и сравните опытные данные с результатами расчетов.

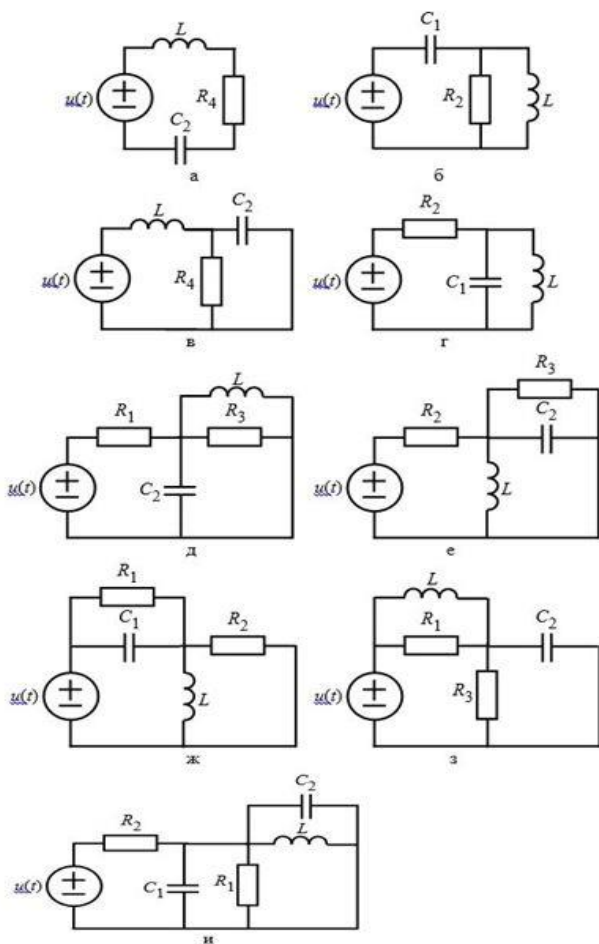


Рис. 3.8. Схемы для самостоятельного исследования

3.6. Вопросы для самопроверки

1) Как изменится частота собственных колебаний RC -цепи первого порядка (рис 3.1), если величину емкости конденсатора в ней увеличить в 2 раза?

2) Как изменится вид осциллограммы (рис. 3.2) переходного процесса RC -цепи первого порядка (рис 3.1), если величину емкости конденсатора в ней увеличить в 2 раза?

3) Увеличится или уменьшится длительность переходного процесса в RLC -цепи второго порядка (рис. 3.4) при замене проводником резистора R_4 ?

4) Как изменится переходный процесс в RC -цепи второго порядка (рис. 3.6) при отключении R_3 ?

5) Чем и почему отличаются переходные процессы в RC -цепи второго порядка (рис. 3.6) и в RLC -цепи третьего порядка (рис. 3.7)?

6) Чем и почему отличаются осциллограммы RLC -цепи второго порядка (рис. 3.4) и третьего порядка (рис. 3.7)?

7) Как зависит форма осциллограмм от собственных частот цепей?

8) Как построить эквивалентную схему замещения цепи в установившемся режиме и определить вынужденную составляющую переходного процесса?

9) Как определить постоянную интегрирования свободной составляющей переходного процесса?

РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Цель работы: исследование установившегося процесса в простых RL , RC и RLC – цепях при гармонических воздействиях.

4.1. Исследование установившегося режима при гармонических воздействиях в RC и RL цепях.

4.1.1. Теоретические сведения

В установившемся режиме работы цепей переменного синусоидального тока, анализируя амплитудные и фазовые соотношения между токами и напряжениями

для элементов цепи необходимо учитывать, что ток в резистивном элементе совпадает по фазе с напряжением, ток в индуктивности отстает от напряжения на 90^0 , а в емкости опережает напряжение на 90^0 . При этом сопротивления индуктивности и емкости комплексные функции частоты

$$Z_L = j\omega L = \omega L e^{j90^0}; \quad Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{\omega C} e^{-j90^0}.$$

Схемы RC и RL цепей приведены на рис. 4.1.

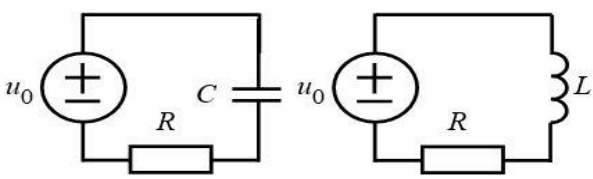


Рис. 4.1. RC и RL цепи

Для выполнения работы используются катушка индуктивности, конденсатор и набор резисторов. Источником питания служит генератор стандартных сигналов (ГС) в режиме синусоидальной формы выходного напряжения. Осциллограммы напряжения и тока снимаются с помощью осциллографа.

4.1.2. Порядок проведения измерений

Соберите схему RC -цепи с измерительными приборами, изображенную на рис.4.2.

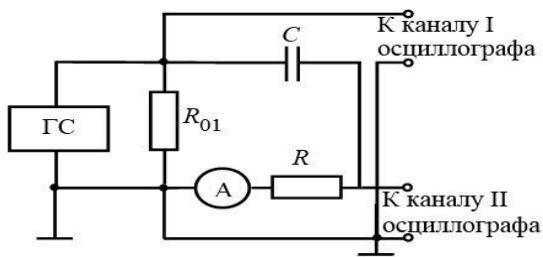


Рис. 4.2. Исследуемая RC -цепь

Резистор $R_{01} = 50$ Ом включен параллельно выходу генератора для приближения свойств последнего к свойствам идеального источника напряжения.

Установите напряжение на выходе ГС (на сопротивлении R_{01}) $U = 2$ В и частоту ГС $f = 7,5$ кГц.

Измерьте значения тока I в цепи и напряжений U_R , U_C на конденсаторе и резисторе. Результаты занесите в табл.4.1. Снимите осциллограмму входного напряжения и тока исследуемой цепи. По осциллограмме определите угол сдвига фаз напряжения и тока. По данным измерений вычислите сопротивление R , и емкость конденсатора C и постройте векторную диаграмму тока и напряжений. Сравните величины угла сдвига, полученные по осциллограмме и по векторной диаграмме

Таблица 4.1

Устанавливаются		Измеряют					Вычисляются			
f , кГц	U_0 , В	I , мА	U_R , В	U_C , В	U_L , В	φ° осц	R , Ом	C , мкФ	L , мГн	φ° вД

Проведите те же измерения на частоте $f = 15$ кГц и результаты занесите в табл. 4.1, Снимите снова осциллограммы входного напряжения и тока, определите сопротивление резистора R и емкость конденсатора C и постройте векторную диаграмму тока и напряжений.

Соберите схему RL -цепи с измерительными приборами приведенную на рис. 4.3.

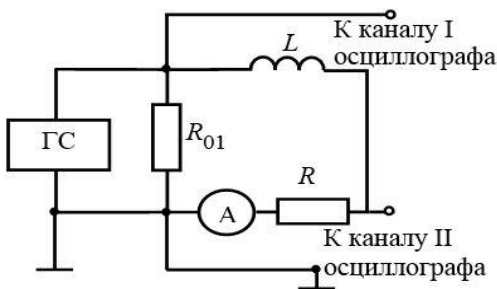


Рис. 4.3. Исследуемая RL -цепь

Повторите для RL -цепи все операции, выполненные выше для RC -цепи при частотах $f = 7,5$ и $3,75$ кГц. Результаты занесите в таблицу 4.1.

4.2. Исследование установившегося режима при гармонических воздействиях в RLC — цепи

4.2.1. Теоретические сведения

Схема RLC – цепи приведена на рис. 4.4.

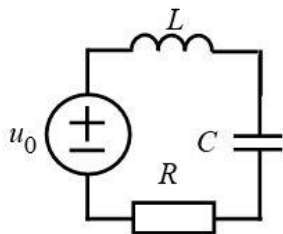


Рис. 4.4. RLC -цепь

Комплексное сопротивление RLC -цепи

$$Z = \dot{U}_0 / \dot{I} = R + Z_L + Z_C = R + j(\omega L - 1/\omega C)$$

Реактивная составляющая этого сопротивления равна разности модулей индуктивного и емкостного сопротивлений и может иметь разные знаки. Если она положительна, то имеет индуктивный характер, если отрицательна, то емкостной, если обращается в нуль, цепь будет находиться в состоянии резонанса.

Модуль и аргумент комплексного сопротивления цепи

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L - 1/\omega C}{R},$$

Действующее значение и начальная фаза тока

$$I = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}; \quad \alpha_i = \alpha_u - \varphi$$

Все эти величины существенно зависят от соотношений индуктивного и емкостного сопротивлений.

Токи и напряжения цепи в установившемся синусоидальном режиме можно наглядно представить с помощью векторной диаграммы. Пример такой векторной

диаграммы, на которой ток \dot{I} опережает напряжение \dot{U}_0 на 45° , что соответствует емкостной реакции цепи, и соответствующей ей временной диаграммы приведены на рис. 4.5.

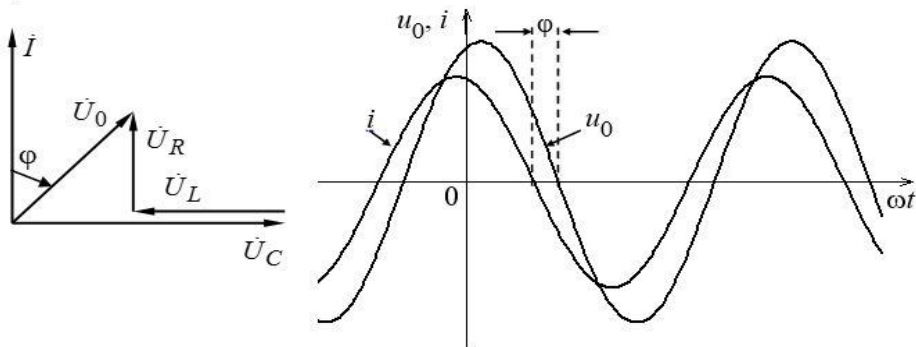


Рис. 4.5. Векторная и временная диаграммы RLC-цепи

4.2.2. Порядок проведения измерений

Соберите схему, изображенную на рис.4.6.

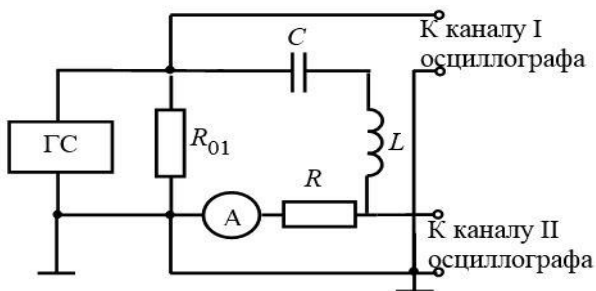


Рис. 4.6. Исследуемая RLC-цепь

На выходе ГС установите напряжение $u_0 = 2$ В. По фигуре Лиссажу, полученной на экране осциллографа после нажатия кнопок “X – Y”, изменяя частоту ГС, определите резонансную частоту f_0 .

При резонансе синусоиды тока и напряжения находятся в фазе и наблюдаемый на экране эллипс превращается в прямую линию.

Измерьте I , U_R , U_C , U_L на частотах $f = f_0$; $f = 2f_0$; $f = 0,5f_0$. Результаты занесите в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Устанавливают		Измеряют					Вычисляют
f , кГц	U_0 , В	I , мА	U_R , В	U_C , В	U_L , В	$\varphi^\circ_{\text{осц}}$	$\varphi^\circ_{\text{вд}}$

Далее снимите осциллограммы входного напряжения и тока исследуемой цепи для трех указанных выше частот. По данным, полученным в результате проведенных измерений, постройте векторные диаграммы.

По векторным диаграммам определите величину сдвига фаз между входным напряжением и током. Сравните углы сдвига фаз, полученные по векторным диаграммам с соответствующими значениями этих углов, полученными по осциллограммам.

4.3. Самостоятельное исследование

Определите резонансную частоту RL -цепи другими способами и сравните с результатом, полученным ранее.

4.4. Вопросы для самопроверки

- 1) Почему в RC -цепи (рис. 4.2) $U_0 \neq U_R + U_C$ и в RL -цепи (рис.4.3) $U_0 \neq U_R + U_L$?
- 2) Почему при увеличении частоты напряжения на входе RC -цепи (рис. 4.2) ток I и напряжение на резисторе U_R увеличились, а напряжение на конденсаторе U_C и фазовый сдвиг между входным напряжением и током $|\varphi|$ уменьшились?
- 3) Почему при увеличении частоты напряжения на входе RL -цепи (рис. 4.2) ток I и напряжение на резисторе U_R уменьшились, а напряжение на катушке индуктивности U_L и фазовый сдвиг между входным напряжением и током $|\varphi|$ увеличились?
- 4) Какими способами можно определить резонансную частоту RLC – цепи?
- 5) Как строятся векторные диаграммы RC , RL и RLC цепей?

6) Как изменяется угол сдвига фаз между входным напряжением и током в цепи RLC при увеличении и уменьшении частоты входного напряжения?

РАБОТА №5

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДИНОЧНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРАХ

Цель работы: исследование частотных характеристик последовательного и параллельного колебательных контуров

5.1. Исследование резонанса в последовательном RLC колебательном контуре

5.1.1. Теоретические сведения

Резонанс — это состояние RLC -цепи при котором в установившемся синусоидальном режиме, напряжение и ток на входе цепи совпадают по фазе.

Схема последовательного колебательного контура в режиме вынужденных колебаний приведена на рис. 5.1.

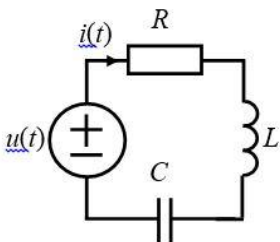


Рис. 5.1. Последовательный колебательный контур

При резонансе сопротивления катушки индуктивности и конденсатора равны и комплексное сопротивление последовательной цепи при этом становится вещественным.

$$Z(j\omega) = R + j(\omega L - 1/\omega C)$$

При этом частота, на которой устанавливается режим резонанса

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

При резонансе ток в цепи достигает максимальной величины $I_0 = U / R$. При этом проводимость контура максимальна

$$|Y| = \frac{1}{|Z|} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega_0 L - 1/\omega_0 C)^2}} = \frac{1}{R}$$

Напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности при резонансе равны и компенсируют друг друга, так как их векторы направлены противоположно. Поэтому резонанс в последовательном контуре называется резонансом напряжений (последовательным резонансом).

Эти напряжения могут быть во много раз больше напряжения источника. Отношение действующего значения напряжения на реактивных элементах к напряжению источника при резонансе называется добротностью Q последовательного контура

$$Q = \frac{U_{C0}}{U} = \frac{U_{L0}}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\rho}{R}$$

где величина $\rho = \sqrt{L/C}$ называется характеристическим сопротивлением контура.

Если в режиме резонанса измерены напряжения на входе U и на емкости U_{C0} , ток I_0 и резонансная частота f_0 , то из приведенных соотношений можно определить все параметры последовательного контура: сопротивление потерь R , добротность Q и характеристическое сопротивление ρ , а емкость конденсатора и индуктивность катушки индуктивности:

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 \rho}, \quad L = \frac{\rho}{2\pi f_0}$$

При отклонении частоты от резонансной, реактивное сопротивление последовательного контура растет и ток в нем уменьшается.

Зависимость модуля проводимости контура от частоты называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) или резонансной кривой последовательного контура

$$|Y(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{1}{R\sqrt{1 + Q^2(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2}}$$

Примерный вид АЧХ при различных значениях добротности и сопротивления потерь контура показан на рис. 5.2.

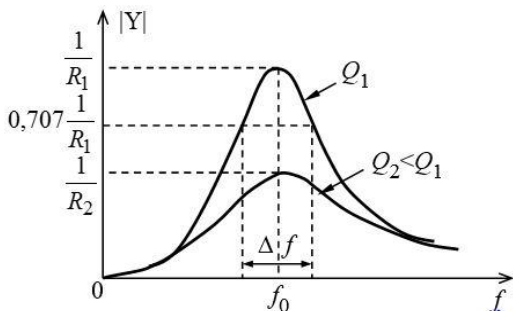


Рис. 5.2. АЧХ последовательного резонансного контура

При постоянной величине входного напряжения так же будет выглядеть зависимость тока в контуре от частоты.

Ширина резонансной кривой контура на уровне $1/\sqrt{2}$ (0,707) от максимума АЧХ называется полосой пропускания Δf и определяет его частотную избирательность. Добротность контура равна отношению f_0 к ширине полосы пропускания: $Q = f_0 / \Delta f$

Исследуемые в работе цепи, питаются от источника синусоидального напряжения роль которого выполняет генератор стандартных сигналов (ГС). Чтобы напряжение на входе цепи было практически неизменным, параллельно выходу генератора подключено сопротивление, величина которого много меньше сопротивления контура во всех режимах его работы,

5.1.2. Порядок проведения измерений

Исследование резонанса напряжений и АЧХ контура с малыми потерями

Соберите схему, приведенную на рис. 5.3

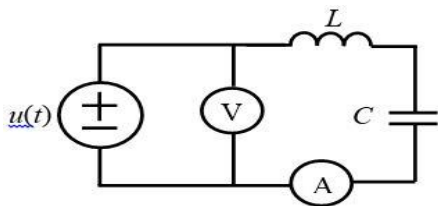


Рис. 5.3. Схема последовательного контура с малыми потерями

Потери в этом контуре обусловлены не идеальностью элементов индуктивности и емкости и характеризуются их активным сопротивлением потерь R_0 , т.е. в этой цепи $R = R_0$.

Установите напряжение источника U равным 2 В. Изменяя частоту ГС в пределах 1 — 7 кГц, определите резонансную частоту f_0 по максимуму тока. При $f = f_0$ напряжение источника может уменьшиться, тогда его следует увеличить до 2В. В режиме резонанса проведите измерение величин, указанных в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Измеряют при резонансе				Вычисляют				
U , В	I_0 , мА	f_0 , кГц	U_{C0} , В	R , Ом	Q	ρ , Ом	L , Гн	C , мкФ

По данным измерений вычислите $R = R_0$, Q , ρ , L , и C .

Для построения АЧХ измерьте, поддерживая напряжение источника $U = 2$ В, значения тока при изменении частоты в диапазоне 1 – 3 кГц через 1 кГц и в диапазоне 3 – 5 кГц через 100 Гц, далее рекомендуется снова изменять частоту через 1 кГц,

Результаты измерений занесите в табл. 5.2, в которую также следует перенести значение тока I_0 в цепи на частоте резонанса $f = f_0$ из табл. 5.1.

Таблица 5.2

Измеряют		Вычисляют $ Y(j\omega) $, См
f , кГц	I_C , мА	

Определить две частоты, при которых величина тока $I = 0,707I_0$, вычислить полосу пропускания и добротность контура.

Исследование резонанса напряжений и АЧХ контура с большими потерями
Соберите схему, приведенную на рис. 5.4.

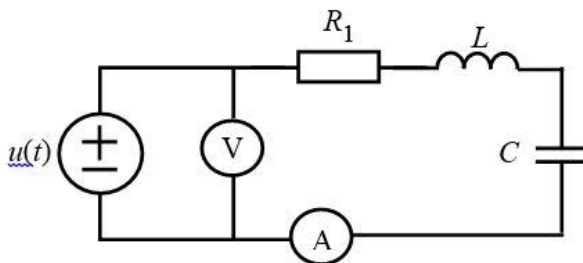


Рис.5.4. Схема последовательного контура с большим сопротивлением потерь

Провести те же исследования, что и для контура с малыми потерями, учитывая, что в этом контуре сопротивление потерь складывается из потерь в элементах L , C и R_1 , т.е. $R = R_1 + R_0$.

Результаты занесите в табл. 5.1 и 5.2. Полоса пропускания цепи с большими потерями шире, чем у контура с малыми потерями, поэтому рекомендуется в диапазоне 4 – 5 кГц изменять частоту через 200 Гц.

По результатам измерений вычислите R и Q .

Исследование влияния величины емкости контура на его характеристики
Соберите схему, приведенную на рис. 5.5.

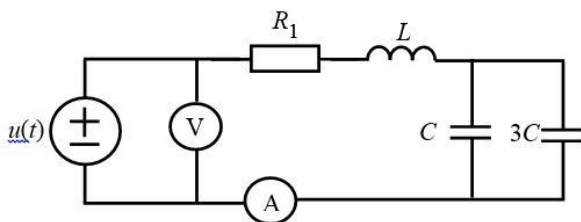


Рис. 5.5. Схема последовательного контура с емкостной нагрузкой

Проведите те же измерения, что и для предыдущей схемы рис. 5.4. Частоту входного напряжения следует изменять в диапазоне 1 – 4 кГц, через 100 Гц, а в диапазоне 2 – 3 кГц – через 200 Гц.

5.2. Исследование резонанса в параллельном RLC колебательном контуре

5.2.1. Теоретические сведения

Схема параллельного RLC – контура приведена на рис. 5.6.

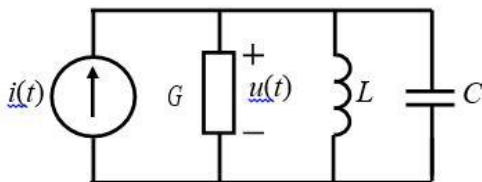


Рис. 5.6. Параллельный RLC – контур

По своим свойствам эта схема дуальна рассмотренной выше схеме последовательного контура, представленной на рис. 5.1. При резонансе, когда равны реактивные сопротивления катушки индуктивности и конденсатора, становится максимальным модуль комплексного сопротивления этого контура

$$|Z| = \frac{1}{|Y|} = \frac{1}{\sqrt{G^2 + (\omega_0 C - 1/\omega_0 L)^2}} = \frac{1}{G}$$

и на частоте резонанса $\omega = \omega_0$

$$U_0 = I / G.$$

Токи, протекающие в индуктивной и емкостной ветвях цепи при резонансе, компенсируют друг друга и могут быть значительно больше тока источника, поэтому такой резонанс называется резонансом токов или параллельным резонансом. Отношение действующего значения тока в реактивных элементах к току источника при $\omega = \omega_0$ называют добротностью параллельного контура:

$$Q = \frac{I_{C0}}{I} = \frac{I_{L0}}{I} = \frac{\omega_0 C}{G} = \frac{1}{\omega_0 L G} = \frac{1}{\rho G} = \frac{R}{\rho}.$$

Если в режиме резонанса измерены входной ток I и ток емкости I_{C0} , напряжение на контуре при резонансе U_0 и резонансная частота f_0 , то по приведенным выше формулам можно определить проводимость потерь в контуре G , его добротность Q и характеристическое сопротивление ρ , индуктивность катушки L и емкость конденсатора C .

Для параллельного контура АЧХ – это зависимость модуля сопротивления от частоты:

$$|Z(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{G^2 + (\omega C - 1/\omega L)^2}} = \frac{1}{G\sqrt{1 + Q^2(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2}}.$$

При этом АЧХ параллельного контура выглядит так же как АЧХ последовательного, показанная на рис. 5.2, если по оси ординат откладывать модуль сопротивления контура $|Z(j\omega)|$. При постоянном значении тока в контуре так же будет выглядеть зависимость напряжения на нем от частоты. Полоса пропускания Δf определяется, как и для последовательного контура, на уровне $1/\sqrt{2}$ (0,707) от максимума АЧХ и добротность контура $Q = f_0 / \Delta f$.

Цепи, исследуемые в этом разделе, питаются от источника тока $i(t)$. Для приближения свойств генератора сигналов (ГС) к свойствам идеального источника тока, последовательно с выходом ГС включено сопротивление, величина которого много больше сопротивления контура во всех режимах его работы, так что ток через входные зажимы будет практически неизменным.

5.2.2. Порядок проведения измерений

Исследование резонанса токов и АЧХ контура с малыми потерями

Соберите схему, приведенную на рис. 5.7.

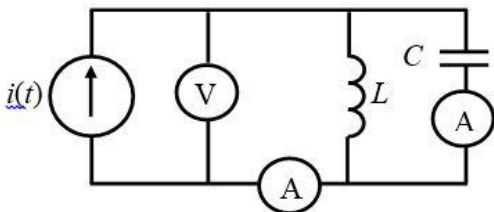


Рис. 5.7. Схема параллельного контура с малыми потерями

Потери в цепи G_0 , объясняются не идеальностью элементов L и C , наличием у них собственной проводимости потерь, т.е. в схеме, представленной на рис. 5.6. $G = G_0$.

Установите ток источника I равным 0,5 мА. Изменяя частоту ГС в пределах от 1 до 7 кГц, определите резонансную частоту f_0 по максимуму напряжения на контуре. Величину тока I при этом следует поддерживать постоянной, равной 0,5 мА. Результаты измерений занесите в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Измеряют при резонансе				Вычисляют					
I , мА	U_0 , В	f_0 , кГц	I_{C0} , мА	Q	G , См	$R = 1/G$, Ом	ρ , Ом	L , Гн	C , мкФ

Для получения АЧХ проведите измерения напряжения при изменении частоты, поддерживая значение тока источника $I = 0,5$ мА.

Частоту изменять через 1 кГц в диапазоне 1 – 3 кГц, в диапазоне 3 – 5 кГц через 100 Гц и далее снова через 1 кГц. Результаты измерений, в том числе значение U_0 при $f = f_0$ занесите в табл. 5.4,

Таблица 5.4

Измеряют		Вычисляют $ Z(j\omega) $, Ом
f , кГц	U , В	

На АЧХ определить нижнюю и верхнюю граничные частоты полосы пропускания контура, при которых $U = 0,707U_0$, вычислить ширину полосы пропускания Δf и добротность контура Q .

Исследование резонанса токов и АЧХ контура с большими потерями

Соберите схему, приведенную на рис. 5.8.

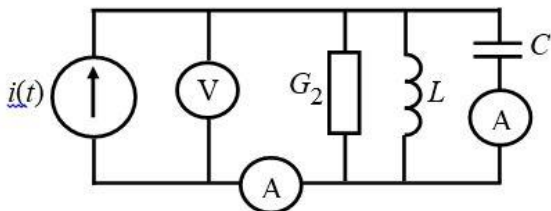


Рис. 5.8. Схема параллельного контура с большой проводимостью потерь

Проводимость потерь в контуре на рис. 5.8: $G = G_2 + G_0$. Методика исследований такая же, как для предыдущей схемы рис. 5.7, результаты занесите в табл. 5.3 и 5.4.

Так как добротность этого контура меньше, чем добротность контура с малыми потерями и полоса пропускания его шире, то следует в диапазоне 4 – 5 кГц изменять частоту через 200 Гц. По результатам измерений вычислите проводимость и сопротивление контура G , $R = 1/G$ и его добротность Q .

Исследование влияния изменения емкостной нагрузки на характеристики контура

Соберите схему, приведенную на рис. 5.9.

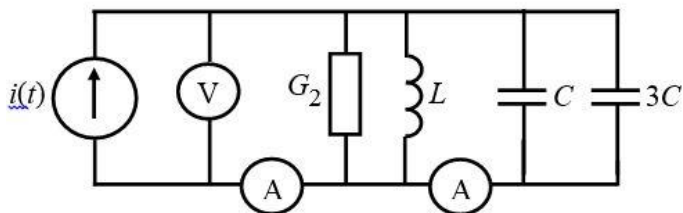


Рис. 5.9. Схема параллельного контура с емкостной нагрузкой

Проведите такие же измерения, как для предыдущей схемы (рис. 5.8), изменяя частоту ГС в диапазоне от 1 до 4 кГц, через 200 Гц.

5.3. Самостоятельное исследование

1) Определите теоретически и экспериментально как изменятся резонансная частота, полоса пропускания и АЧХ цепи рис 5.5, если емкостные элементы соединить последовательно.

2) Определите теоретически и экспериментально как изменится резонансная частота, полоса пропускания и АЧХ цепи рис. 5.9, если емкостные элементы соединить последовательно.

3) Определите теоретически как изменятся характеристики последовательного и параллельного колебательных контуров при увеличении индуктивности в 4 раза.

5.4. Вопросы для самопроверки

1) Используя эквивалентные схемы последовательного контура представленного на рис.5.1 для $\omega = 0$, $\omega = \infty$ и $\omega = \omega_0$, определите значения АЧХ на этих частотах и проверьте результаты эксперимента.

2) Чем отличаются результаты измерений и расчетов для последовательных колебательных контуров с малыми и большими потерями?

3) Чем и почему отличаются результаты измерений и расчетов для последовательных колебательных контуров без нагрузки и с емкостной нагрузкой?

4) Используя эквивалентные схемы параллельного контура, представленного на рис.5.6 для $\omega = 0$, $\omega = \infty$ и $\omega = \omega_0$, определите значения АЧХ на этих частотах и проверьте результаты эксперимента?

5) Чем отличаются результаты измерений и расчетов для параллельных колебательных контуров с малыми и большими потерями?

6) Чем и почему отличаются результаты измерений и расчетов для параллельных колебательных контуров без нагрузки и с емкостной нагрузкой?

РАБОТА №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Цель работы: исследование частотных LC – и RLC – двухполюсников

6.1. Исследование частотных характеристик LC – двухполюсника

6.1.1. Теоретические сведения

В работе исследуются частотные характеристики реактивного LC –двухполюсника, схема которого приведена на рис. 6.1.

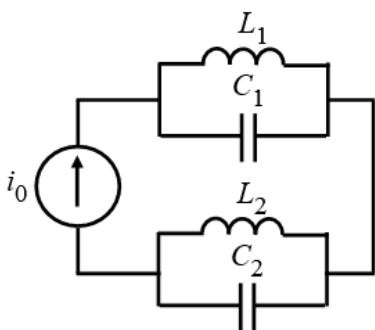


Рис. 6.1. Исследуемый LC двухполюсник

Входное сопротивление пассивного двухполюсника (ДП) в установившемся синусоидальном режиме

$$Z(j\omega) = |Z(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)} = r(\omega) + jx(\omega).$$

График модуля входного сопротивления $|Z(j\omega)|$ – амплитудно-частотная характеристика ДП (АЧХ), график его аргумента $\varphi(\omega)$ – фазо-частотная характеристика ДП (ФЧХ), графики $r(\omega)$ и $x(\omega)$ – частотные характеристики вещественной и мнимой частей ДП. Используют также амплитудно-фазовую характеристику (АФХ), представляющую собой геометрическое место значений $Z(j\omega)$ на комплексной плоскости (годограф).

При резонансе в пассивном двухполюснике выполняются условия

$Im Z(j\omega) = 0$ и $Im Y(j\omega) = 0$, т.е. на резонансной частоте ω_0 в установившемся синусоидальном режиме ток и напряжение двухполюсника совпадают по фазе: $\varphi(\omega_0) = 0$.

Для LC – двухполюсника в общем случае входное сопротивление мнимая нечетная дробно-рациональная функция частоты:

$$Z(j\omega) = jx(\omega) = jk \frac{\omega(\omega_{1н}^2 - \omega^2)(\omega_{2н}^2 - \omega^2)\dots}{(\omega_{1т}^2 - \omega^2)(\omega_{2т}^2 - \omega^2)\dots}$$

Нули $j\omega_{кн}$ и полюсы $j\omega_{кт}$ сопротивления $Z(j\omega)$, определяемые соответственно из условия резонанса напряжений, при котором $Z(j\omega) = 0$ и условия резонанса токов, при котором $Z(j\omega) = \infty$, совпадают с резонансными частотами LC – двухполюсника. Они являются мнимыми числами и располагаются, чередуясь друг с другом, на оси $j\omega$ плоскости комплексной частоты $s = \sigma + j\omega$.

В зависимости от структуры и элементов цепи в начале координат располагается либо нуль, либо полюс. Общее число резонансов напряжений и токов на единицу меньше количества реактивных элементов.

Используя указанные свойства реактивных двухполюсников, а также свойство $dx/d\omega \geq 0$, можно построить частотные характеристики $x(\omega)$ качественно. Для идеального двухполюсника, изображенного на рис. 6.1 частотная характеристика $x(\omega)$, приведена на рис. 6.2.

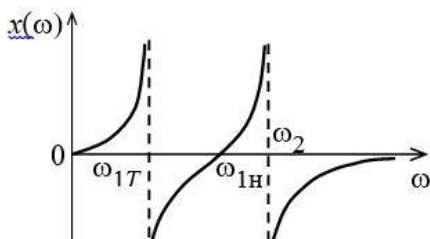


Рис. 6.2. Вид АЧХ исследуемого двухполюсника

АЧХ идеального ДП может быть построена качественно для $\omega > 0$ исходя из следующих соображений: в цепи возможны лишь три резонансные частоты $\omega_{1т}$, $\omega_{1н}$

и ω_{2T} ; предельные значения сопротивления $x(0) = 0$ и $x(\infty) = 0$ оцениваются путем анализа эквивалентной схемы замещения при $\omega = 0$ и $\omega \rightarrow \infty$.

АЧХ двухполюсника с реальными катушками индуктивности и конденсаторами, полученная опытным путем, не принимает нулевых и бесконечно больших значений; она является непрерывной функцией частоты, но при высокой добротности контуров, исследуемых в работе ($Q \geq 15 - 20$), сохраняет большую крутизну в области резонансных значений частоты.

Перед экспериментальным исследованием выполните следующее расчетное задание, необходимое для контроля опытных данных:

6.1.2. Порядок проведения исследований

Вычислите резонансные частоты LC – двухполюсника, приведенного на рис. 6.1, с параметрами элементов: $L_1 = 8 \cdot 10^{-2}$ Гн, $L_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ Гн, $C_1 = 0,1$ мкФ, $C_2 = 0,05$ мкФ), по формулам

$$f_{1T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}; f_{1н} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 L_2 (C_1 + C_2)}}; f_{2T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$$

и постройте качественно график АЧХ $|Z(j\omega)|$ двухполюсника.

Соберите схему, изображенную на рис. 6.3, где ДП – двухполюсник. На схеме $R_0 = 200$ Ом – дополнительное сопротивление, с которого снимается напряжение, пропорциональное току двухполюсника.

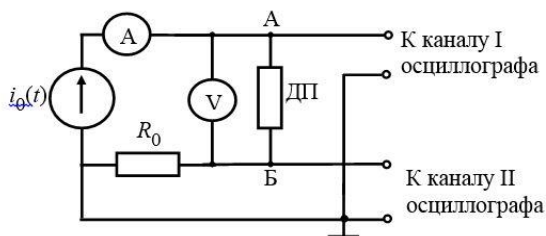


Рис. 6.3. Схема для исследования характеристик двухполюсника

Выход генератора синусоидальных сигналов (ГС) подключите к клеммам “ГС” работы на лабораторном стенде. Чтобы приблизить свойства ГС к свойствам источника тока и обеспечить на входе двухполосника неизменный ток, последовательно с входом ГС включен расположенный под платой резистор R_{δ} , сопротивление которого значительно больше сопротивления двухполосника в исследуемом диапазоне частот.

Установите входной ток двухполосника $I = 1$ мА и определите резонансные частоты f_{1T} , f_{1H} , f_{2T} , используя фигуры Лиссажу на экране осциллографа. При этом переключатель режима работы усилителя осциллографа установите в положение “П X – Y”, а переключатель синхронизации – в положение “X – Y”.

Для получения фигур Лиссажу на входы осциллографа нужно подать напряжение двухполосника u_{AB} и пропорциональное току двухполосника напряжение U_{R_0} с сопротивления R_0 . На схеме рис. 6.3 вместо U_{AB} к каналу I осциллографа подводится напряжение $u_{AB} + u_{R_0}$, но вносимая при этом ошибка невелика, так как R_0 много меньше сопротивления двухполосника.

Изменяя частоту ГС в диапазоне Δf от $0,2f_{1T}$ до $2f_{1T}$ где f_{1T} вычисленная выше резонансная частота, зафиксируйте частоты, при которых на экране осциллографа эллипс превращается в линию. Это происходит при резонансе, когда синусоиды напряжения и тока двухполосника совпадают по фазе. При этом регулируйте усиление канала I так, чтобы весь эллипс умещался на экране осциллографа.

Снимите АЧХ двухполосника. Для этого измерьте напряжение на входе цепи U_{AB} для 3 – 5 значений частоты между соседними резонансными частотами. Зафиксируйте минимальные и максимальные значения функции $U_{AB}(f)$ и значения напряжения на резонансных частотах. Результаты измерения $U_{AB}(f)$ занесите в табл. 6.1, приведенную ниже и рассчитайте зависимость $|Z(j\omega)|$ от частоты.

Значения ФЧХ LC – двухполосника определите качественно, считая двухполосник идеальным, т.е. $\varphi = 90^\circ$ при индуктивном характере сопротивления двухполосника $x > 0$ и $\varphi = -90^\circ$ – при емкостном. Постройте графики АЧХ и ФЧХ,

по данным экспериментальных исследований и сравните их с полученными качественно.

Таблица 6.1.

f , кГц	I , мА	U_{AB} , В	$ Z $, кОм	ϕ , град

6.2. Исследование частотных характеристик LC – двухполюсника

6.2.1. Теоретические сведения

В работе исследуются частотные характеристики RLC –двухполюсника, схема которого приведена на рис. 6.4.

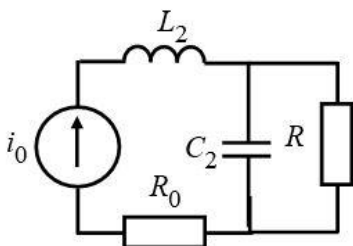


Рис. 6.4. Исследуемый RLC -двухполюсник

В приведенной схеме RLC – двухполюсника в зависимости от соотношения значений параметров R , L , C , резонанс может наблюдаться или не наблюдаться. Частоты, при которых $|Z(j\omega)|$ имеет максимальное и минимальное значения в общем случае могут не совпадать с резонансными.

Примерный вид резонансной АЧХ для RLC -двухполюсника показан на рис.6.5.

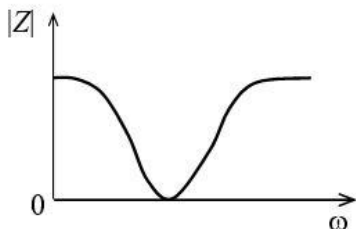


Рис. 6.5. Резонансная кривая RLC -двухполосника

6.2.2. Порядок проведения исследований

Перед проведением экспериментальных исследований вычислите значение частоты

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2} - \frac{1}{R^2 C_2^2}}$$

при значениях параметров реактивных элементов:

$L_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ Гн, $C_2 = 0,05$ мкФ и сопротивлениях резистора $R=R_1 = 2$ кОм и $R=R_2 = 0,3$ кОм. Выясните, при каком из этих значений сопротивления R резонанс невозможен.

Исследование частотных характеристик RLC – двухполосника, в котором резонанс возможен

Соберите схему двухполосника, приведенную на рис. 6.4 и включите ее в схему исследования характеристик двухполосника рис.6.3. Используйте тот из резисторов, при котором на основании проведенного выше расчета возможен резонанс.

Проведите исследование АЧХ тем же способом, что и для двухполосника LC . Получите данные измерений в 6 – 7 точках Δf от $0,2f_p$ до $2f_p$ и занесите в таблицу 6.1.

Снимите ФЧХ двухполосника, для чего подайте на вход I осциллографа напряжение на двухполоснике, а на вход II – напряжение U_{R_0} с сопротивления R_0 , пропорциональное току двухполосника.

Рекомендуется подбирать такой масштаб по горизонтали, чтобы на всех частотах период сигнала соответствовал одинаковому числу делений градуированной шкалы.

Значения ФЧХ снимите для указанных в таблице частот и, с учетом знака φ занесите их в последний столбец таблицы. Обязательно включите в таблицу данные измерения при резонансе и на частоте минимума АЧХ. Вычислите $|Z(j\omega)|$.

Используя графики АЧХ и ФЧХ, постройте АФХ. Для этого целесообразно определить по графику ФЧХ значения частот, соответствующих некоторым величинам угла φ , например, $\varphi = \pm 20^\circ, \pm 40^\circ$, и т. д.. Затем для этих частот по АЧХ отсчитайте значения $|Z(j\omega)|$ и нанесите точки, соответствующие концам вектора $Z(j) = |Z(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$, на комплексную плоскость. К полученным таким образом точкам АФХ добавьте точки, определяемые значениями $Z(j\omega)$ при резонансной, нулевой и бесконечной частотах.

Исследование частотных характеристик RLC – двухполюсника, в котором резонанс невозможен

Проведите те же исследования, что и в предыдущем пункте используя резистор, при котором резонанс невозможен.

6.3. Самостоятельные исследования

1) Из элементов, расположенных на лабораторном макете, составьте RLC-цепь, имеющую АЧХ, типа представленной на рис.6.5. и снимите ее АЧХ.

2) Докажите, что определение резонансных частот по фигурам Лиссажу в п.6.1.2 проведено правильно, несмотря на то, что на осциллограф подано напряжение $U_{AB} + U_0$ вместо U_{AB} .

6.4. Вопросы для самопроверки

1) Чем отличаются частотные характеристики реальных двухполюсников, составленных из катушек индуктивностей и конденсаторов, от характеристик идеальных реактивных двухполюсников?

2) Как проконтролировать полученные в результате измерений АЧХ и ФЧХ по эквивалентным схемам цепи $f = 0, f = \infty, f = f_{1T}, f_{2T}$?

3) Можно ли по частотным характеристикам (АЧХ, ФЧХ, АФХ) определить резонансные частоты двухполюсника и по каким признакам?

4) Почему отсутствует резонанс в исследуемой RLC – цепи и какие из графиков (АЧХ, ФЧХ или АФХ) об этом свидетельствуют?

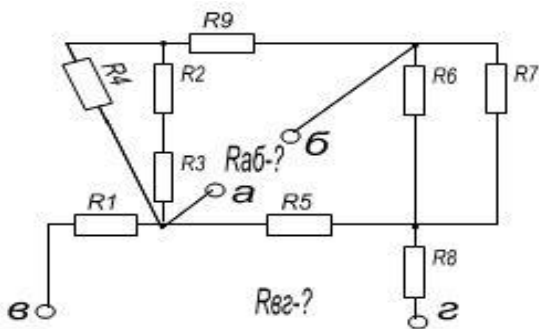
5) Как проконтролировать АЧХ, ФЧХ и АФХ цепи при $f = 0$ и $f = \infty$?

ПРИЛОЖЕНИЯ

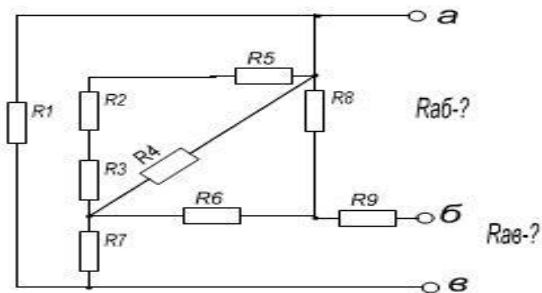
Приложение 1.

Варианты исходных данных задач по теме 1 практических занятий

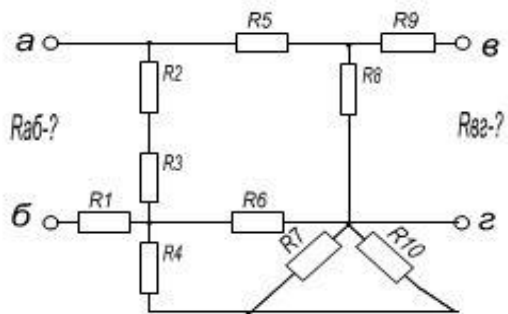
1)



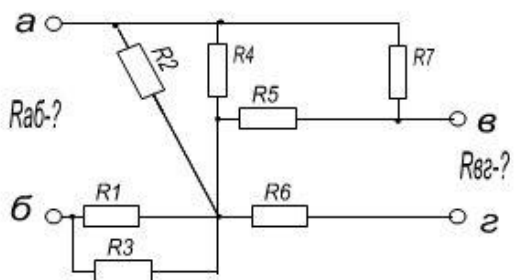
2)



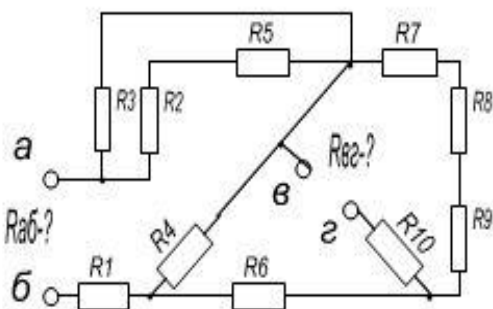
3)



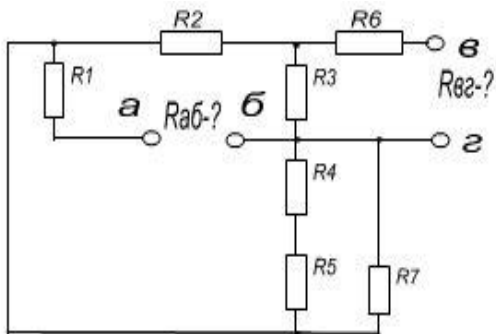
4)



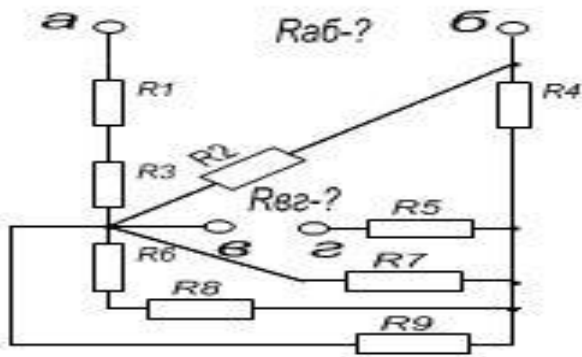
5)



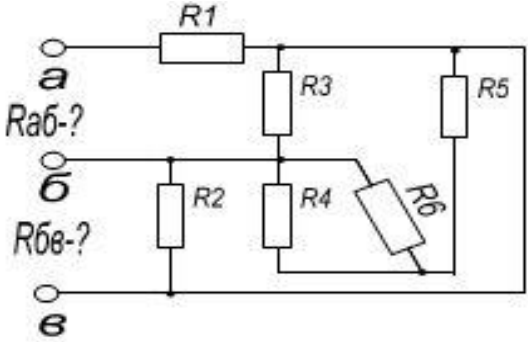
6)



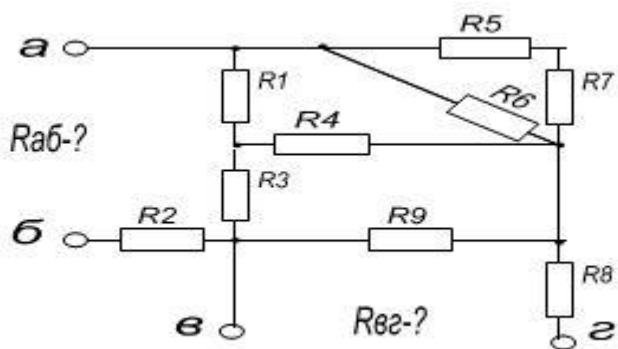
7)



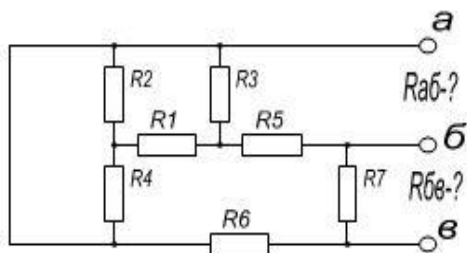
8)



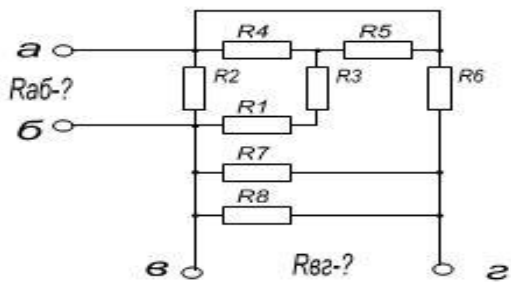
9)



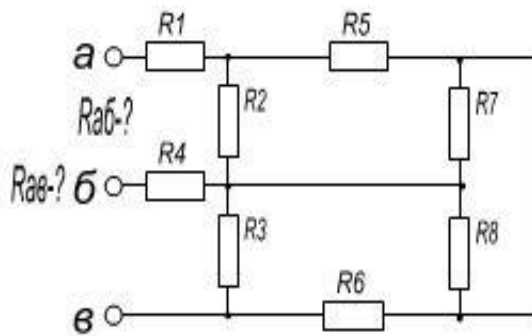
10)



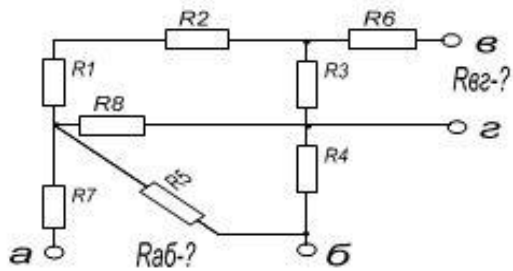
11)



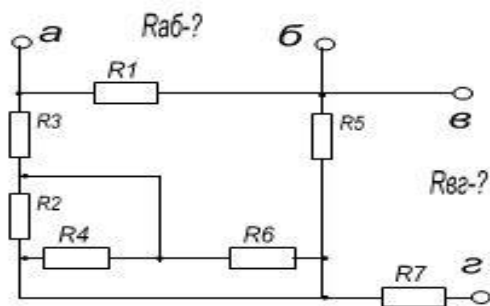
12)



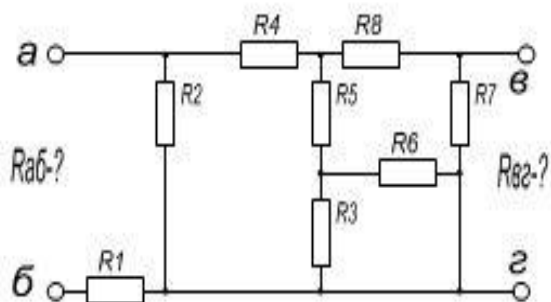
13)



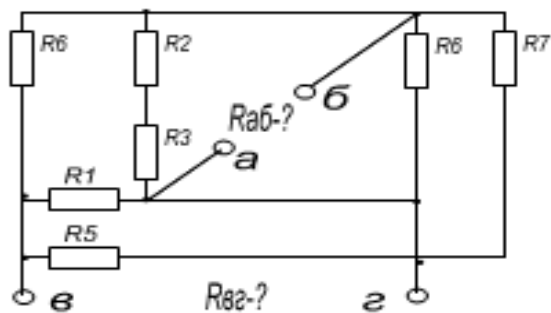
14)



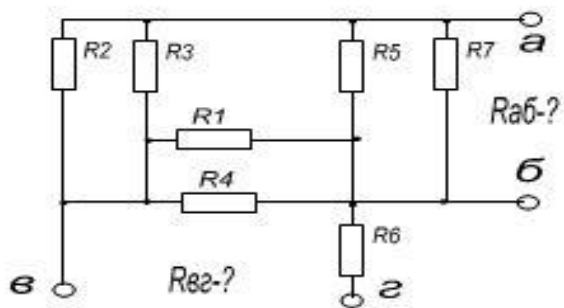
15)



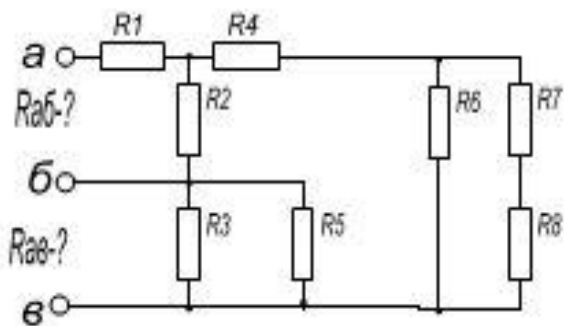
16)



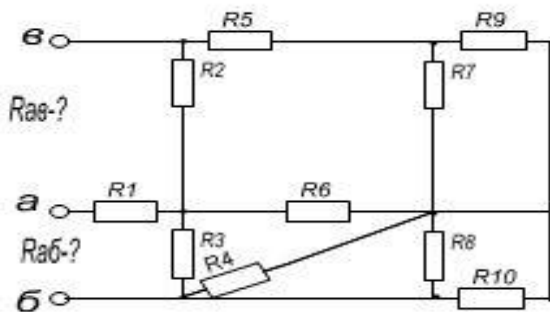
17)



18)



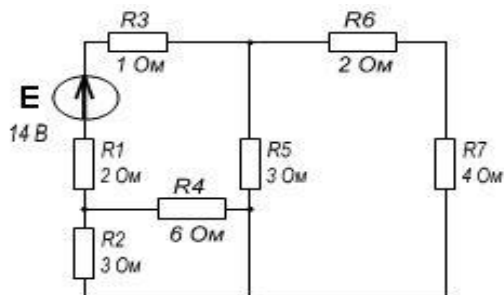
19)



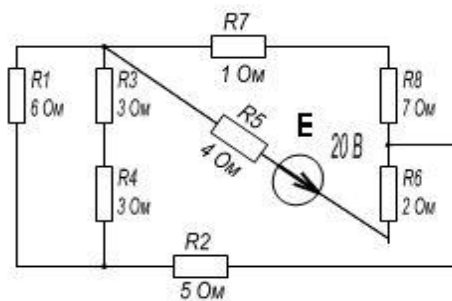
Приложение 2.

Варианты исходных данных задач по теме 2 практических занятий

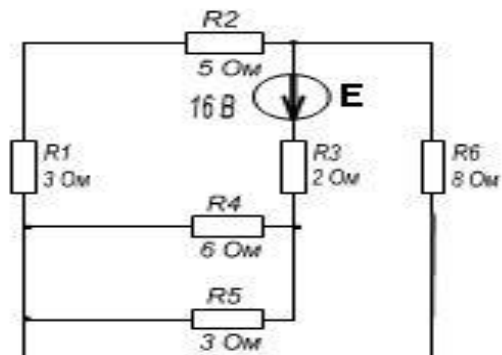
1)



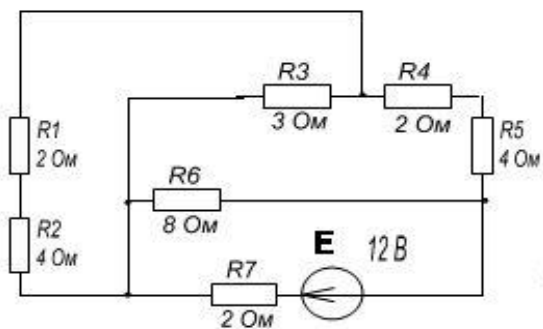
2)



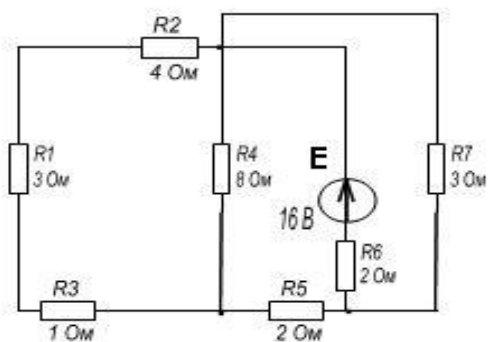
3)



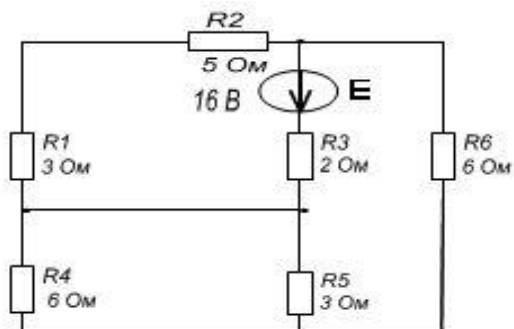
4)



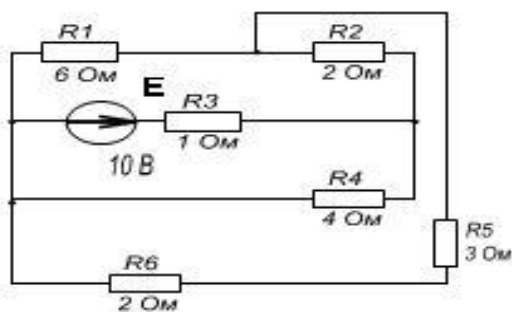
5)



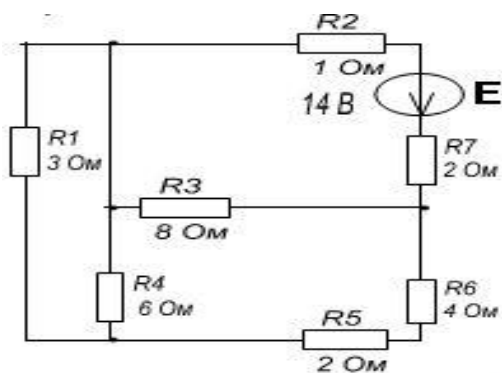
6)



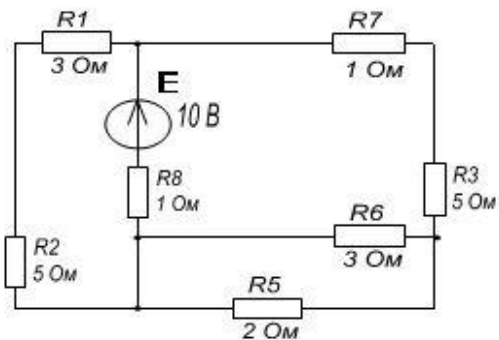
7)



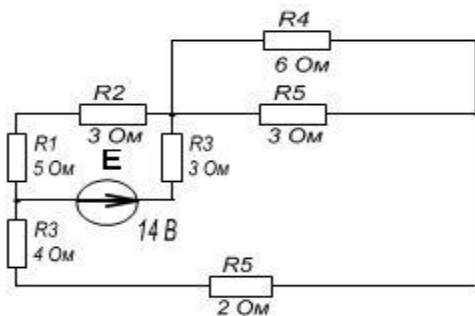
8)



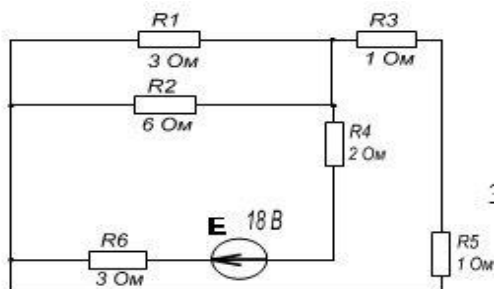
9)



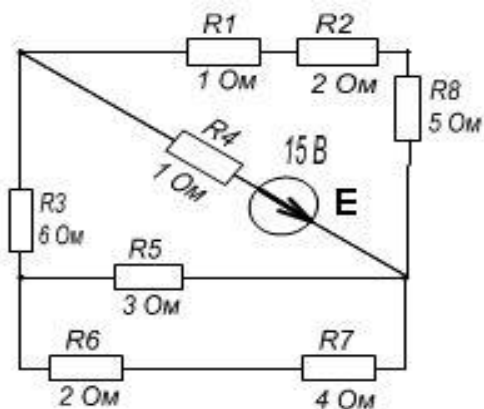
10)



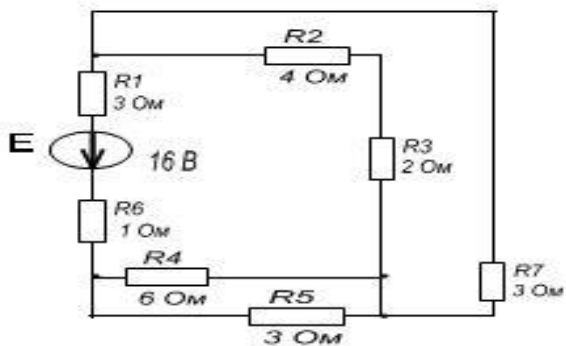
11)



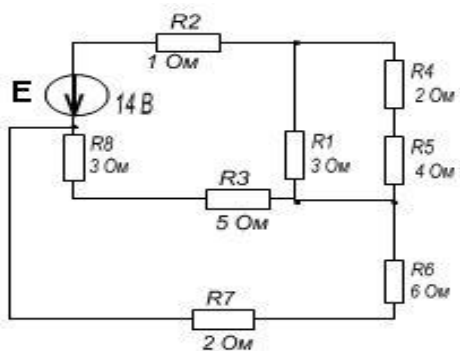
12)



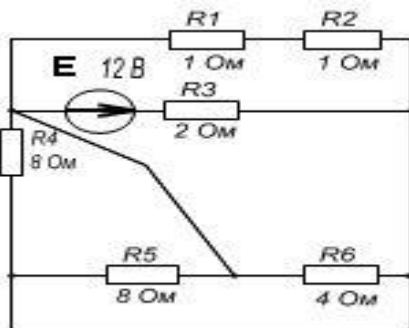
13)



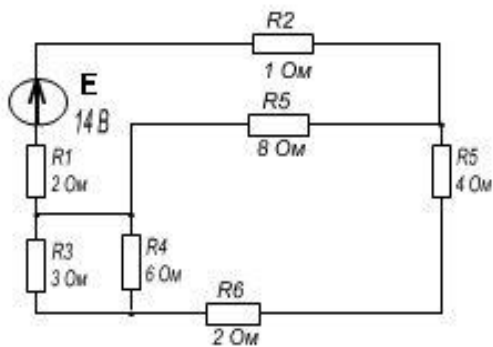
14)



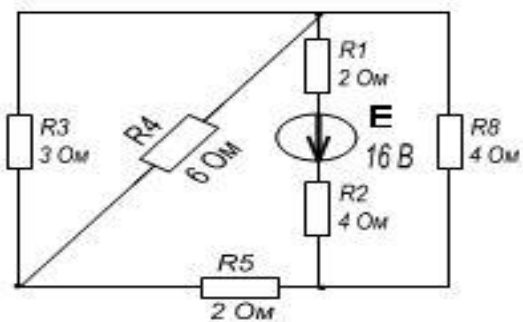
15)



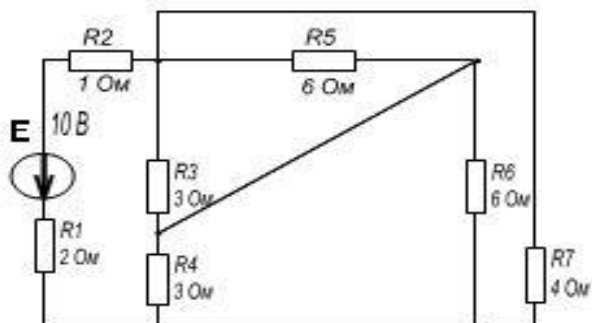
16)



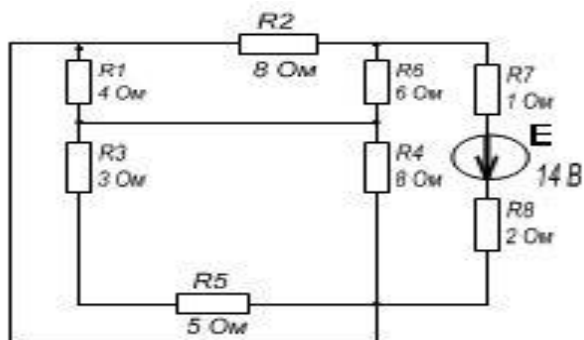
17)



18)



19)



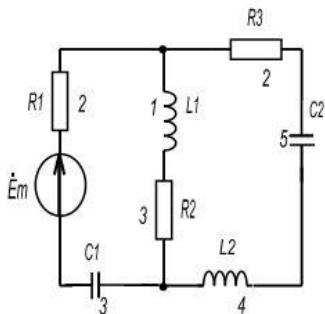
Приложение 3.

Варианты исходных данных задач по теме 3 практических занятий

1)

Дано: $\dot{E}_m = 12e^{-j40}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

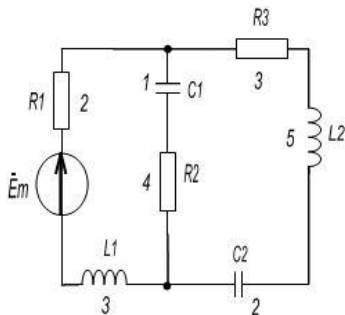
$f = 20$ кГц



2)

Дано: $\dot{E}_m = 15e^{j70}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

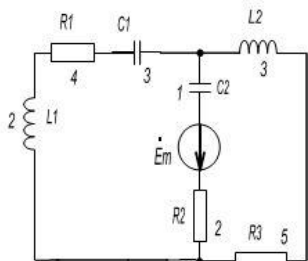
$f = 40$ кГц



3)

Дано: $\dot{E}_m = 20e^{-j120}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

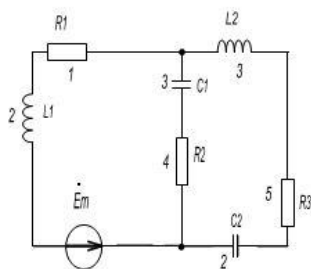
$f = 30$ кГц



4)

Дано: $\dot{E}_m = 10e^{j110}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

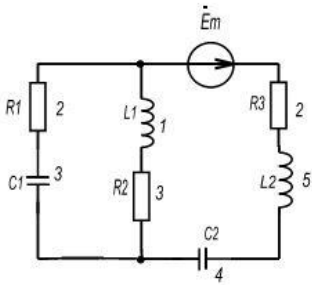
$f = 50$ кГц



5)

Дано: $\dot{E}_m = 16e^{j140}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

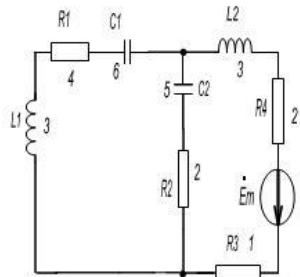
$f = 45$ кГц



6)

Дано: $\dot{E}_m = 15e^{j60}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

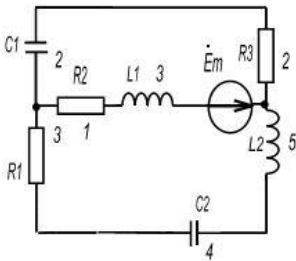
$f = 30$ кГц



7)

Дано: $\dot{E}_m = 16e^{j180}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

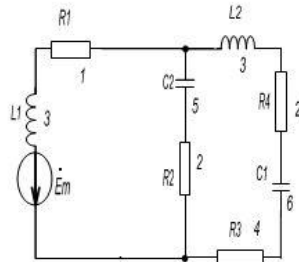
$f = 40$ кГц



8)

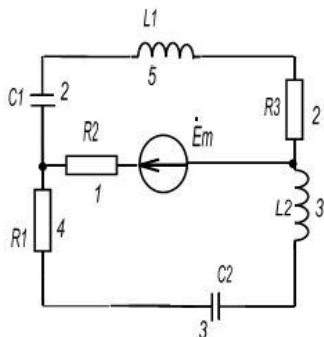
Дано: $\dot{E}_m = 10e^{j50}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

$f = 20$ кГц



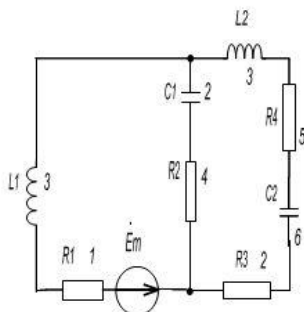
9)

Дано: $\dot{E}_m = 14e^{j70}$, $X_L(\text{Ом})$, $X_C(\text{Ом})$, $R(\text{Ом})$,
 $f = 50 \text{ кГц}$



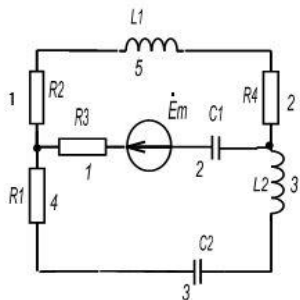
10)

Дано: $\dot{E}_m = 15e^{j150}$, $X_L(\text{Ом})$, $X_C(\text{Ом})$, $R(\text{Ом})$,
 $f = 20 \text{ кГц}$



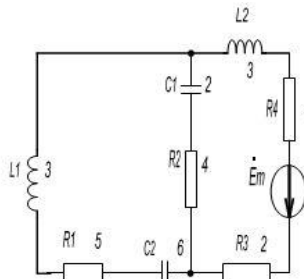
11)

Дано: $\dot{E}_m = 18e^{-j130}$, $X_L(\text{Ом})$, $X_C(\text{Ом})$, $R(\text{Ом})$,
 $f = 40 \text{ кГц}$



12)

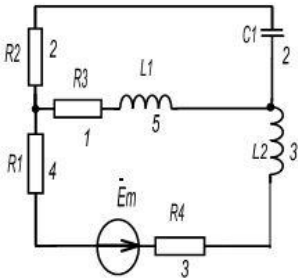
Дано: $\dot{E}_m = 10e^{-j50}$, $X_L(\text{Ом})$, $X_C(\text{Ом})$, $R(\text{Ом})$,
 $f = 60 \text{ кГц}$



13)

Дано: $\dot{E}_m = 12e^{j140}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

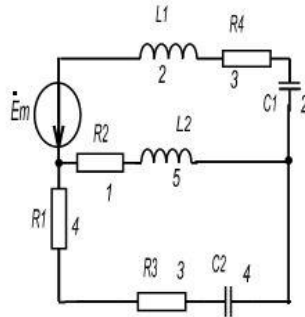
$f = 30$ кГц



14)

Дано: $\dot{E}_m = 15e^{j160}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

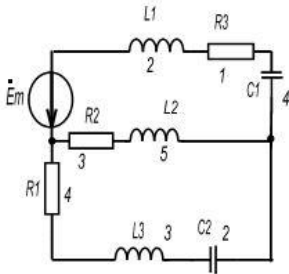
$f = 40$ кГц



15)

Дано: $\dot{E}_m = 20e^{j140}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

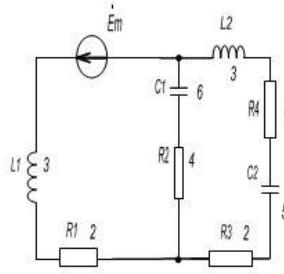
$f = 20$ кГц



16)

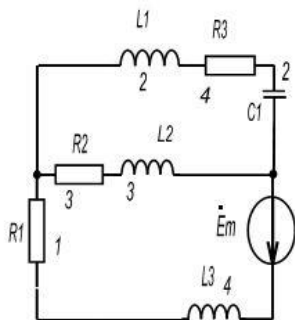
Дано: $\dot{E}_m = 10e^{j150}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

$f = 40$ кГц



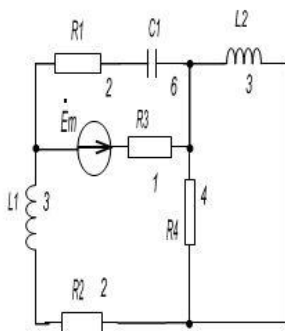
17)

Дано: $\dot{E}_m = 12e^{-j120}$, X_l (Ом), X_c (Ом), R (Ом),
 $f = 30$ кГц



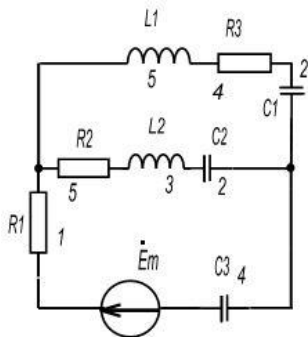
18)

Дано: $\dot{E}_m = 15e^{j80}$, X_l (Ом), X_c (Ом), R (Ом),
 $f = 25$ кГц



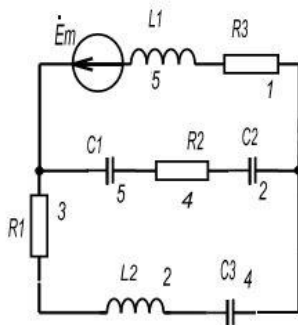
19)

Дано: $\dot{E}_m = 20e^{-j70}$, X_l (Ом), X_c (Ом), R (Ом),
 $f = 40$ кГц



20)

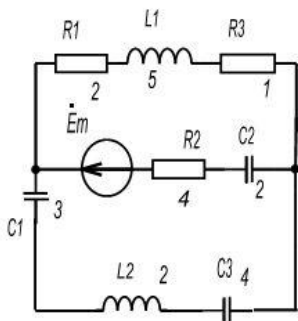
Дано: $\dot{E}_m = 10e^{j240}$, X_l (Ом), X_c (Ом), R (Ом),
 $f = 30$ кГц



21)

Дано: $\dot{E}_m = 12e^{i50}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

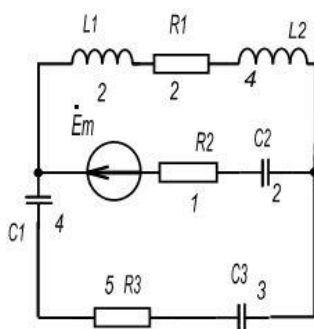
$f = 30$ кГц



22)

Дано: $\dot{E}_m = 15e^{i160}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

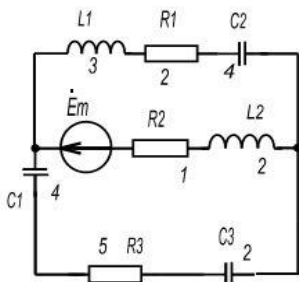
$f = 45$ кГц



23)

Дано: $\dot{E}_m = 20e^{i130}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

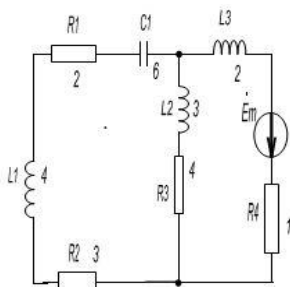
$f = 20$ кГц



24)

Дано: $\dot{E}_m = 10e^{i130}$, X_L (Ом), X_C (Ом), R (Ом),

$f = 40$ кГц



Приложение 4.

Варианты исходных данных задач по теме 4 практических занятий

1)

Схема рис. 4.1.

Дано: $L=40$ мкГн; $R=5$ Ом; $f=2$ МГц; $\rho=400$ Ом; $I=12$ мА

Вычислить: C (пФ); U_{L0} , U_{C0} (В); Q ; Δf (кГц); U (В); I_0 (мА)

2)

Схема рис. 4.1.

Дано: $f_0=1,2$ МГц; $f=2,5$ МГц; $\rho=500$ Ом; $Q=100$; $U=7$

Вычислить: L (мкГн); C (пФ); R (Ом); U_{L0} , U_{C0} (В); Δf (кГц); U_L , U_C (В); I_0 (мА)

3)

Схема рис. 4.2.

Дано: $f_0=1,4$ МГц; $f=2,8$ МГц; $Q=120$; $I_{L0}=I_{C0}=120$ мА; $U_0=110$ В

Вычислить: R (Ом); I (мА); ρ (Ом); Δf (кГц); Z_0 (кОм); Z (кОм) U (В)

4)

Схема рис. 4.1.

Дано: $L=90$ мкГн; $R=5$ Ом; $\rho=600$ Ом; $I=80$ мА; $U_c=18$ В

Вычислить: C (пФ); f_0 (МГц); f (МГц); Δf (кГц); Q ; U_L , U_C (В)

5)

Схема рис. 4.2.

Дано: $R=18$ Ом; $L=80$ мкГн; $Z_0=60$ кОм; $Z=4$ кОм; $U=6$ В

Вычислить: C (пФ); f_0 (МГц); Δf (кГц); Q ; ρ (Ом); I (мА); I_L (мА); I_C (мА)

6)

Схема рис. 4.2.

Дано: $f_0=1,4$ МГц; $f=2,8$ МГц; $Z_0=60$ кОм; $U_0=6$ В; $\rho=800$ Ом

Вычислить: Δf (кГц); Q ; I (мА); I_{L0} (мА); I_{C0} (мА); R (Ом); U (В)

7)

Схема рис. 4.1.

Дано: $L=40$ мкГн; $C=20$ пФ; $Q=120$; $U_C=5$ В; $U_L=1$ В; $I_0=0,4$ А
Вычислить: R (Ом); Δf (кГц); f_0 (МГц); f (МГц); U_{L0} , U_{C0} , $U(B)$, ρ (Ом)

8)

Схема рис. 4.2.

Дано: $I=3$ мА; $\rho=600$ Ом; $Q=130$; $\Delta f=50$ кГц; $U=6$ В

Вычислить: R (Ом); f_0 (МГц); f (МГц); $U_0(B)$; Z (кОм); Z_0 (кОм)

9)

Схема рис. 4.1.

Дано: $f_0=2,8$ МГц; $R=4$ Ом; $Q=90$; $U=12$ В

Вычислить: L (мкГн); C (пФ); U_{L0} ; ρ (Ом); Δf (кГц)

10)

Схема рис. 4.2.

Дано: $R=8$ Ом; $L=60$ мкГн; $C=30$ пФ; $I=1,5$ мА

Вычислить: f_0 (МГц); Δf (кГц); Q ; ρ (Ом); I_{L0} (мА); I_{C0} (мА); Z_0 (кОм); $U_0(B)$

11)

Схема рис. 4.1.

Дано: $C=80$ пФ; $f_0=2,5$ МГц; $\Delta f=30$ кГц; $I_0=0,5$ А

Вычислить: U_{L0} , U_{C0} , $U(B)$, ρ (Ом), R (Ом); Q

12)

Схема рис. 4.2.

Дано: $R=6$ Ом; $L=150$ мкГн; $Q=90$; $I=5$ мА

Вычислить: f_0 (МГц); Δf (кГц); C (пФ); ρ (Ом); I_{L0} (мА); I_{C0} (мА); Z_0 (кОм)

13)

Схема рис. 4.2.

Дано: $L=120$ мкГн; $C=300$ пФ; $f=1$ МГц; $Q=80$; $U_0=50$ В

Вычислить: R (Ом); f_0 (МГц); I (мА); ρ (Ом); Z (кОм); Z_0 (кОм)

14)

Схема рис. 4.1.

Дано: $C=70$ пФ; $Q=110$; $\Delta f=12$ кГц; $UL=4$ В; $I=3$ мА

Вычислить: R (Ом); f_0 (МГц); f (МГц); $U_C(B)$; ρ (Ом); L (мкГн)

15)

Схема рис. 4.1.

Дано: $L=60$ мкГн; $C=40$ пФ; $R=8$ Ом; $U=10$ В; $U_C=5$ В; $U_L=12$ В

Вычислить: f_0 (МГц); f (МГц); U_{L0} , U_{C0} (В), ρ (Ом); Δf (кГц); Q ; I_0 (А)

16)

Схема рис. 4.1.

Дано: $L=90$ мкГн; $R=4$ Ом; $U=12$ В; $\rho=700$ Ом

Вычислить: f_0 (МГц); U_{L0} , U_{C0} (В), Δf (кГц); Q ; I_0 (А)

17)

Схема рис. 4.1.

Дано: $R=3$ Ом; $U=6$ В; $f_0=1,2$ МГц; $f=2,4$ МГц; $Q=120$

Вычислить: U_L , U_C (В); I_0 (мА); ρ (Ом); I (мА)

18)

Схема рис. 4.2.

Дано: $I_{L0}=I_{C0}=120$ мА; $\rho=700$ Ом; $\Delta f=12$ кГц; $C=40$ пФ

Вычислить: f_0 (МГц); I (мА); Z_0 (кОм); Q ; R (Ом); L (мкГн); U_0 (В)

19)

Схема рис. 4.2.

Дано: $Q=120$; $f_0=8$ МГц; $f=2,4$ МГц; $I_{L0}=I_{C0}=120$ мА

Вычислить: R (Ом); Z (кОм); Z_0 (кОм); U (В), ρ (Ом); Δf (кГц)

20)

Схема рис. 4.1.

Дано: $U=12$ В; $\rho=700$ Ом; $Q=120$; $f_0=8$ МГц; $f=2,4$ МГц

Вычислить: U_{L0} , U_{C0} (В), Δf (кГц); I_0 (А); I (мА); R (Ом); C (пФ); L (мкГн); U_L , U_C (В)

21)

Схема рис. 4.2.

Дано: $R=5$ Ом; $f_0=4$ МГц; $f=8$ МГц; $Z_0=60$ кОм;

Вычислить: C (пФ); L (мкГн); Z (кОм); Q ; ρ (Ом); Δf (кГц)

22)

Схема рис. 4.1.

Дано: $R=8 \text{ Ом}$; $U=6 \text{ В}$; $L=60 \text{ мкГн}$; $C=40 \text{ пФ}$; $U_C=5 \text{ В}$; $U_L=12 \text{ В}$

Вычислить: U_{L0} , $U_{C0} \text{ (В)}$; $I_0 \text{ (мА)}$; $\rho \text{ (Ом)}$; Q ; $\Delta f \text{ (кГц)}$; $f_0 \text{ (МГц)}$; $f \text{ (МГц)}$

23)

Схема рис. 4.1.

Дано: $U_C=20 \text{ В}$; $I=120 \text{ мА}$; $L=90 \text{ мкГн}$; $R=3 \text{ Ом}$; $\rho=700 \text{ Ом}$

Вычислить: $f \text{ (МГц)}$; Q ; $\Delta f \text{ (кГц)}$; $f_0 \text{ (МГц)}$; $C \text{ (пФ)}$; $U_L \text{ (В)}$

24)

Схема рис. 4.1.

Дано: $R=4 \text{ Ом}$; $U=12 \text{ В}$; $L=50 \text{ мкГн}$; $C=30 \text{ пФ}$; $U_C=3 \text{ В}$; $U_L=18 \text{ В}$

Вычислить: U_{L0} , $U_{C0} \text{ (В)}$; $I_0 \text{ (мА)}$; $\rho \text{ (Ом)}$; Q ; $\Delta f \text{ (кГц)}$; $f_0 \text{ (МГц)}$; $f \text{ (МГц)}$

Приложение 5.

Варианты исходных данных задач по теме 5 практических занятий

1)

Схема рис. 5.1в.

Дано: $f_0=2$ МГц; $y_0=0,8$; $2\Delta f^*=8$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; λ_0 ; $M_{св}$; f_m ; η_m ; $y(\xi)$

2)

Схема рис. 5.1б.

Дано: $\lambda_0=600$ М; $2\Delta f_m=14$ кГц; $R=3$ Ом; $\Delta f_m=f_m-f_0$

Вычислить: L ; C ; ρ ; Q ; y_0 ; f_0 ; f^* ; η_m ; $y(\xi)$

3)

Схема рис. 5.1в.

Дано: $\lambda_0=600$ М; $y_0=0,8$; $2\Delta f^*=6$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; f_0 ; $M_{св}$; f_m ; η_m ; $y(\xi)$

4)

Схема рис. 5.1в.

Дано: $f_0=2,8$ МГц; $y_0=0,7$; $2\Delta f^*=9$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; λ_0 ; $M_{св}$; f_m ; η_m ; $y(\xi)$

5)

Схема рис. 5.1б.

Дано: $\lambda_0=600$ М; $y_0=0,8$; $2\Delta f^*=8$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; f_0 ; $L_{св}$; f_m ; η_m ; $y(\xi)$

6)

Схема рис. 5.1а.

Дано: $f_0=2,8$ МГц; $y_0=0,7$; $2\Delta f^*=9$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; λ_0 ; $C_{св}$; f_m ; η_m ; $y(\xi)$

7)

Схема рис. 5.1а.

Дано: $f_0=3$ МГц; $R=3$ Ом; $2\Delta f_m=10$ кГц, где $\Delta f_m=f_m-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; λ_0 ; $C_{св}$; y_0 ; η_m ; $y(\xi)$

8)

Схема рис. 5.1а.

Дано: $f_0=2,5$ МГц; $R=4$ Ом; $2\Delta f_m=12$ кГц, где $\Delta f_m=f_m-f_0$

Вычислить: L ; C ; ρ ; Q ; λ_0 ; $C_{св}$; f^* ; η_m ; $y(\zeta)$

9)

Схема рис. 5.1б.

Дано: $f_0=2,2$ МГц; $R=3$ Ом; $2\Delta f_m=10$ кГц, где $\Delta f_m=f_m-f_0$

Вычислить: L ; C ; ρ ; Q ; y_0 ; $L_{св}$; f^* ; η_m ; $y(\zeta)$

10)

Схема рис. 5.1в.

Дано: $\lambda_0=1000$ м; $y_0=0,9$; $2\Delta f^*=8$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; f_0 ; $M_{св}$; f_m ; η_m ; $y(\zeta)$

11)

Схема рис. 5.1а.

Дано: $f_0=2$ МГц; $Q=110$; $2\Delta f_m=15$ кГц, где $\Delta f_m=f_m-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; λ_0 ; ζ^* ; $C_{св}$; y_0 ; η_m ; $y(\zeta)$

12)

Схема рис. 5.1б.

Дано: $f_0=4$ МГц; $y_0=0,9$; $2\Delta f^*=8$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; λ_0 ; $L_{св}$; f_m ; η_m ; $y(\zeta)$

13)

Схема рис. 5.1в.

Дано: $f_0=1,2$ МГц; $Q=130$; $2\Delta f_m=20$ кГц, где $\Delta f_m=f_m-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; λ_0 ; f^* ; $M_{св}$; y_0 ; η_m ; $y(\zeta)$

14)

Схема рис. 5.1а.

Дано: $\lambda_0=800$ м; $y_0=0,7$; $2\Delta f^*=8$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; f_0 ; $C_{св}$; η_m ; $y(\zeta)$

15)

Схема рис. 5.1б.

Дано: $\lambda_0=1400$ м; $y_0=0,7$; $2\Delta f^*=12$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; $L_{св}$; f_0 ; f^* ; η_m ; $y(\zeta)$

16)

Схема рис. 5.1б.

Дано: $\lambda_0=1100$ м; $y_0=0,8$; $2\Delta f^*=10$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; Q ; $L_{св}$; f_0 ; f^* ; η_m ; $y(\zeta)$

17)

Схема рис. 5.1в.

Дано: $\lambda_0=800$ М; $2\Delta f_m=12$ кГц; $R=3$ Ом; $\Delta f_m=f_m-f_0$

Вычислить: L ; C ; ρ ; Q ; y_0 ; $M_{св}$; f_0 ; f_m ; η_m ; $y(\zeta)$

18)

Схема рис. 5.1б.

Дано: $f_0=4$ МГц; $2\Delta f_m=12$ кГц; $R=3$ Ом; $\Delta f_m=f_m-f_0$

Вычислить: L ; C ; ρ ; Q ; λ_0 ; y_0 ; $L_{св}$; f_m ; η_m ; $y(\zeta)$

19)

Схема рис. 5.1а.

Дано: $f_0=2,5$ МГц; $Q=100$; $2\Delta f_m=12$ кГц, где $\Delta f_m=f_m-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; λ_0 ; y_0 ; $C_{св}$; f^* ; η_m ; $y(\zeta)$

20)

Схема рис. 5.1б.

Дано: $\lambda_0=800$ м; $2\Delta f_m=12$ кГц; $R=3$ Ом; $\Delta f_m=f_m-f_0$

Вычислить: L ; C ; ρ ; Q ; y_0 ; $L_{св}$; f_0 ; f^* ; η_m ; $y(\zeta)$

21)

Схема рис. 5.1в.

Дано: $\lambda_0=600$ М; $2\Delta f_m=10$ кГц; $Q=150$; $\Delta f_m=f_m-f_0$

Вычислить: R ; L ; C ; ρ ; y_0 ; $M_{св}$; f_0 ; ζ^* ; ζ_m ; η_m ; $y(\zeta)$

22)

Схема рис. 5.1в.

Дано: $\lambda_0=1300$ М; $y_0=0,8$; $2\Delta f^*=10$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: $R; L; C; \rho; Q; M_{св}; f_0; f_m; \eta_m; y(\zeta)$

23)

Схема рис. 5.1а.

Дано: $\lambda_0=600$ м; $y_0=0,9$; $2\Delta f^*=8$ кГц, где $\Delta f^*=f^*-f_0$

Вычислить: $R; L; C; \rho; Q; f_0; C_{св}; \eta_m; y(\zeta)$

24)

Схема рис. 5.1в.

Дано: $f_0=1,2$ МГц; $2\Delta f_m=8$ кГц; $Q=120$; $\Delta f_m=f_m-f_0$

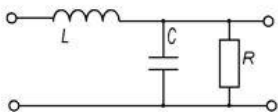
Вычислить: $R; L; C; \rho; M_{св}; f^*; y_0; \eta_m; \lambda_0; y(\zeta)$

Приложение 6.

Варианты исходных данных задач по теме 6 практических занятий

1)

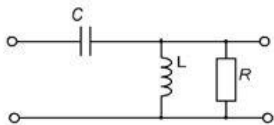
Дано:



$$L = 10 \text{ мГн}, C = 20 \text{ мкФ}, R = 100 \text{ Ом}$$

2)

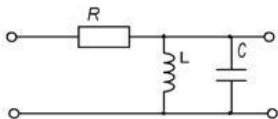
Дано:



$$L = 8 \text{ мГн}, C = 4 \text{ мкФ}, R = 50 \text{ Ом}$$

3)

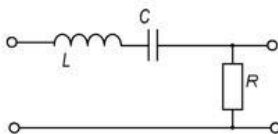
Дано:



$$L = 3 \text{ мГн}, C = 4 \text{ мкФ}, R = 30 \text{ Ом}$$

4)

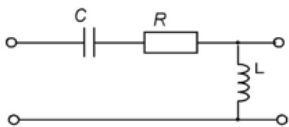
Дано:



$$L = 7 \text{ мГн}, C = 5 \text{ мкФ}, R = 50 \text{ Ом}$$

5)

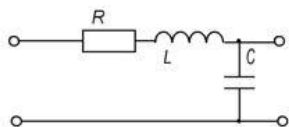
Дано:



$$L = 4 \text{ мГн}, C = 5 \text{ мкФ}, R = 70 \text{ Ом}$$

6)

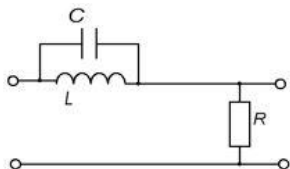
Дано:



$$L = 3 \text{ мГн}, C = 6 \text{ мкФ}, R = 40 \text{ Ом}$$

7)

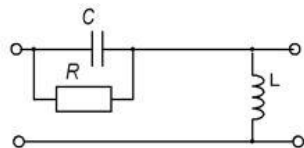
Дано:



$$L = 2 \text{ мГн}, C = 5 \text{ мкФ}, R = 50 \text{ Ом}$$

8)

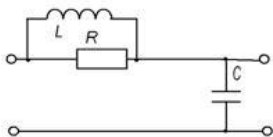
Дано:



$$L = 4 \text{ мГн}, C = 5 \text{ мкФ}, R = 80 \text{ Ом}$$

9)

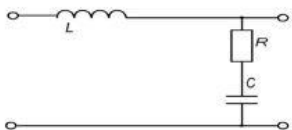
Дано:



$$L = 10 \text{ мГн}, C = 2 \text{ мкФ}, R = 50 \text{ Ом}$$

10)

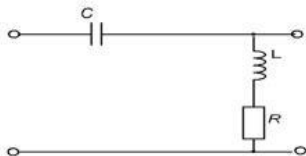
Дано:



$$L = 8 \text{ мГн}, C = 3 \text{ мкФ}, R = 60 \text{ Ом}$$

11)

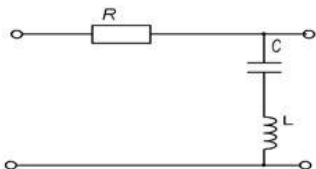
Дано:



$$L = 8 \text{ мГн}, C = 3 \text{ мкФ}, R = 60 \text{ Ом}$$

12)

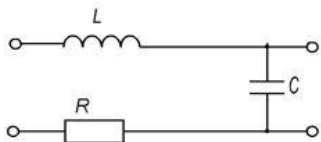
Дано:



$$L = 10 \text{ мГн}, C = 2 \text{ мкФ}, R = 50 \text{ Ом}$$

13)

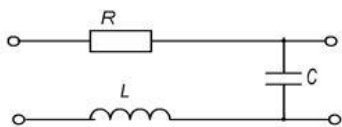
Дано:



$$L = 8 \text{ мГн}, C = 4 \text{ мкФ}, R = 50 \text{ Ом}$$

14)

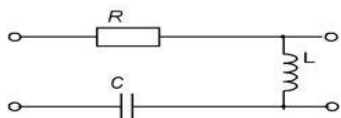
Дано:



$$L = 5 \text{ мГн}, C = 10 \text{ мкФ}, R = 60 \text{ Ом}$$

15)

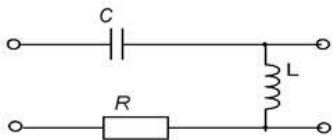
Дано:



$$L = 5 \text{ мГн}, C = 10 \text{ мкФ}, R = 60 \text{ Ом}$$

16)

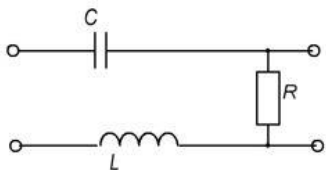
Дано:



$$L = 8 \text{ мГн}, C = 4 \text{ мкФ}, R = 50 \text{ Ом}$$

17)

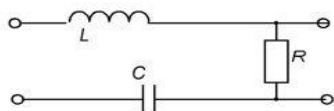
Дано:



$$L = 3 \text{ мГн}, C = 4 \text{ мкФ}, R = 30 \text{ Ом}$$

18)

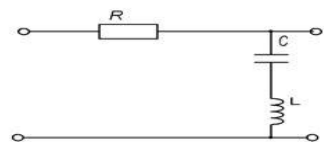
Дано:



$$L = 7 \text{ мГн}, C = 5 \text{ мкФ}, R = 50 \text{ Ом}$$

19)

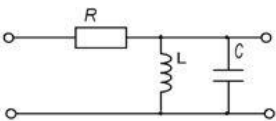
Дано:



$$L = 5 \text{ мГн}, C = 10 \text{ мкФ}, R = 60 \text{ Ом}$$

20)

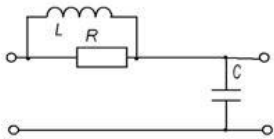
Дано:



$$L = 3 \text{ мГн}, C = 6 \text{ мкФ}, R = 40 \text{ Ом}$$

21)

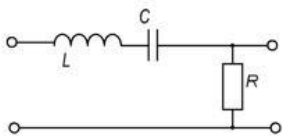
Дано:



$L = 2 \text{ мГн}, C = 5 \text{ мкФ}, R = 50 \text{ Ом}$

22)

Дано:



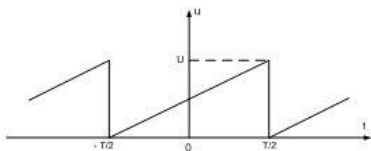
$L = 5 \text{ мГн}, C = 2 \text{ мкФ}, R = 40 \text{ Ом}$

Приложение 7.

Варианты исходных данных задач по теме 7 практических занятий

1)

Дано:

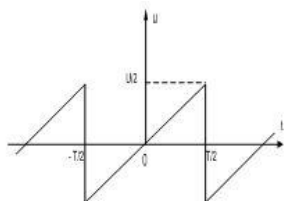


$$u(t) = \frac{U}{2} - \frac{U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi}{n} \sin n\Omega t$$

$$U = 5 \text{ В}, T = 0,5 \text{ мс}$$

2)

Дано:

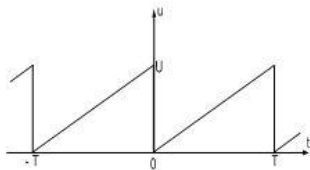


$$u(t) = -\frac{U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi}{n} \sin n\Omega t$$

$$U = 8 \text{ В}, T = 2 \text{ мс}$$

3)

Дано:

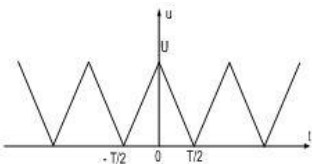


$$u(t) = \frac{U}{2} - \frac{U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n\Omega t$$

$$U = 15 \text{ В}, T = 1 \text{ мс}$$

4)

Дано:

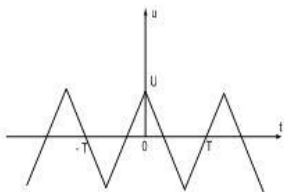


$$u(t) = \frac{U}{2} + \frac{4U}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{n\pi}{2}}{n^2} \cos n\Omega t$$

$$U = 8 \text{ В}, T = 3 \text{ мс}$$

5)

Дано:

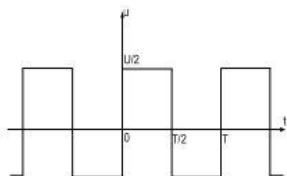


$$u(t) = \frac{8U}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{n\pi}{2}}{n^2} \cos n\Omega t$$

$$U = 14 \text{ В}, T = 4 \text{ мс}$$

6)

Дано:

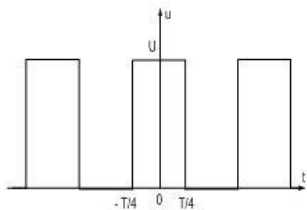


$$u(t) = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{n\pi}{2}}{n} \sin n\Omega t$$

$$U = 12 \text{ В}, T = 5 \text{ мс}$$

7)

Дано:

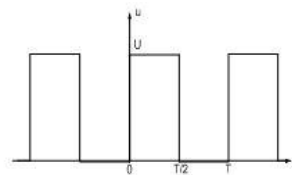


$$u(t) = \frac{U}{2} + \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{n} \cos n\Omega t$$

$$U = 10 \text{ В}, T = 0,8 \text{ мс}$$

8)

Дано:

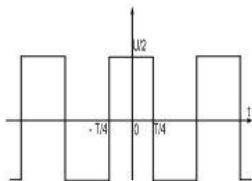


$$u(t) = \frac{U}{2} + \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{n\pi}{2}}{n} \sin n\Omega t$$

$$U = 15 \text{ В}, T = 1,5 \text{ мс}$$

9)

Дано:

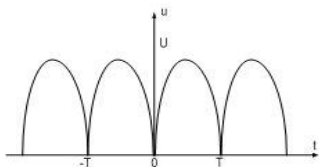


$$u(t) = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{n} \cos n\Omega t$$

$$U = 14 \text{ В}, T = 5 \text{ мс}$$

10)

Дано:

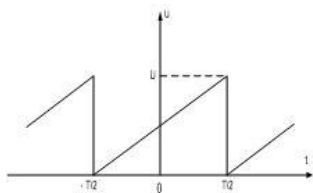


$$u(t) = \frac{2U}{\pi} + \frac{4U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\Omega t + \pi)}{4n^2 - 1}$$

$$U = 8 \text{ В}, T = 4 \text{ мс}$$

11)

Дано:

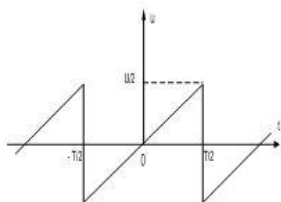


$$u(t) = \frac{U}{2} - \frac{U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi}{n} \sin n\Omega t$$

$$U = 9 \text{ В}, T = 2 \text{ мс}$$

12)

Дано:

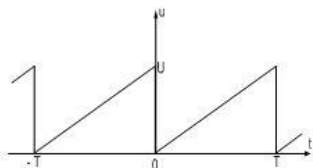


$$u(t) = -\frac{U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi}{n} \sin n\Omega t$$

$$U = 10 \text{ В}, T = 1 \text{ мс}$$

13)

Дано:

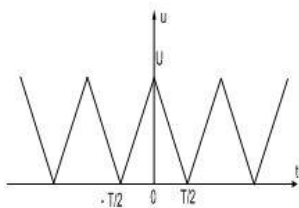


$$u(t) = \frac{U}{2} - \frac{U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n\Omega t$$

$$U = 5 \text{ В}, T = 1,5 \text{ мс}$$

14)

Дано:

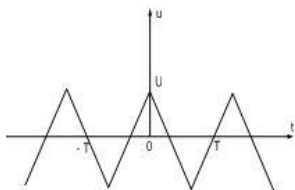


$$u(t) = \frac{U}{2} + \frac{4U}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{n\pi}{2}}{n^2} \cos n\Omega t$$

$$U = 9 \text{ В}, T = 3 \text{ мс}$$

15)

Дано:

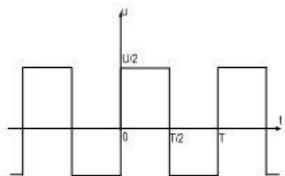


$$u(t) = \frac{8U}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{n\pi}{2}}{n^2} \cos n\Omega t$$

$$U = 12 \text{ В}, T = 4 \text{ мс}$$

16)

Дано:

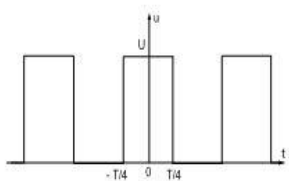


$$u(t) = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{n\pi}{2}}{n} \sin n\Omega t$$

$$U = 6 \text{ В}, T = 0,5 \text{ мс}$$

17)

Дано:

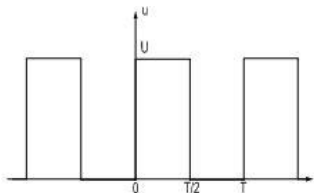


$$u(t) = \frac{U}{2} + \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{n} \cos n\Omega t$$

$$U = 14 \text{ В}, T = 2,5 \text{ мс}$$

18)

Дано:

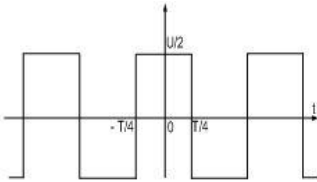


$$u(t) = \frac{U}{2} + \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{n\pi}{2}}{n} \sin n\Omega t$$

$$U = 9 \text{ В}, T = 1,5 \text{ мс}$$

19)

Дано:

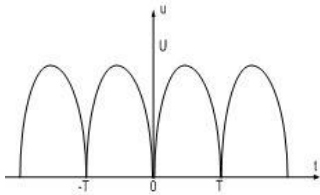


$$u(t) = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{n} \cos n\Omega t$$

$$U = 20 \text{ В}, T = 2 \text{ мс}$$

20)

Дано:

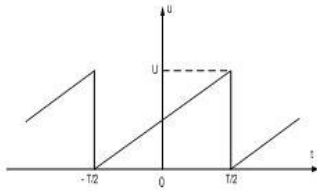


$$u(t) = \frac{2U}{\pi} + \frac{4U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\Omega t + \pi)}{4n^2 - 1}$$

$$U = 15 \text{ В}, T = 3 \text{ мс}$$

21)

Дано:

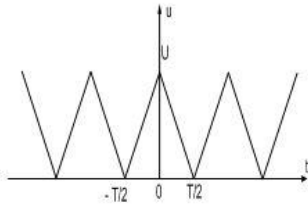


$$u(t) = \frac{U}{2} - \frac{U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi}{n} \sin n\Omega t$$

$$U = 10 \text{ В}, T = 5 \text{ мс}$$

22)

Дано:



$$u(t) = \frac{U}{2} + \frac{4U}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{n\pi}{2}}{n^2} \cos n\Omega t$$

$$U = 8 \text{ В}, T = 2 \text{ мс}$$

Список литературы

1. *Новожилов, О. П.* Электротехника (теория электрических цепей) в 2 ч. Часть 1. [Электронный ресурс]: учебник для академического бакалавриата / О. П. Новожилов. – М.: Издательство Юрайт, 2023. – 403 с. – URL: Режим доступа <https://urait.ru/book/elektrotehnika-teoriya-elektricheskikh-cepey-v-2-ch-chast-1-512886>
2. *Новожилов, О. П.* Электротехника (теория электрических цепей) в 2 ч. Часть 2. [Электронный ресурс]: учебник для академического бакалавриата / О. П. Новожилов. – М.: Издательство Юрайт, 2023. – 247 с. – URL: Режим доступа <https://urait.ru/book/elektrotehnika-teoriya-elektricheskikh-cepey-v-2-ch-chast-2-512887>
3. *Бессонов, Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи в 2 томах. Том 1. [Электронный ресурс]: учебник для академического бакалавриата / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. М. – Издательство Юрайт, 2023. – 831 с. – URL: Режим доступа <https://urait.ru/book/teoreticheskie-osnovy-elektrotehniki-v-2-t-tom-1-elektricheskie-serii-517560>
4. Теоретические основы электротехники. Сборник задач [Электронный ресурс]: учебное пособие для бакалавров / Л. А. Бессонов [и др.] ; отв. ред. Л. А. Бессонов. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2022. – 528 с. – URL: Режим доступа <https://urait.ru/book/teoreticheskie-osnovy-elektrotehniki-sbornik-zadach-508127>
5. *Гаврилов Л.П., Соснин Д.А.* Расчет и моделирование линейных электрических цепей с применением ПК. Учебное пособие. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 448с.
6. *Большаков В.А., Векшина Т.В., Коринец Е.М.* Практикум по дисциплине «Электротехника и электроника». — СПб: РГГМУ, 2020. — 108 с.
7. Сборник задач и практикум по основам теории электрических цепей [Текст]: учеб. пособие / Под. ред. Ю.А. Бычкова, В.М. Золотницкого, Э.П. Чернышева. - Санкт-Петербург: Питер, 2005. - 299 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ.....	3
Порядок выполнения заданий и оформления отчетов.....	3
Тема 1. Эквивалентные преобразования линейной элнетрической цепи постоянного тока.....	3
Тема 2. Анализ линейной электрической цепи постоянного тока.....	4
Тема 3. Анализ линейной электрической цепи переменного синусоидального тока.....	8
Тема 4. Анализ одиночного колебательного контура.....	11
Тема 5. Анализ системы двух связанных колебательных контуров.....	15
Тема 6. Анализ частотных характеристик четырехполосника.....	18
Тема 7. Анализ реакции четырехполосника на периодическое воздействие сложной формы	20
ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ.....	23
Организация лабораторных занятий.....	23
Работа 1. Исследование характеристик резисторов и источников электроэнергии.....	25
Работа 2. Исследование свободных процессов в линейных электрических цепях.....	30
Работа 3. Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях при подключении источника электроэнергии.....	38
Работа 4. Исследование установившегося режима в линейных электрических цепях при гармоническом воздействии.....	47
Работа 5. Исследование резонансных процессов в одиночных колебательных контурах.....	53
Работа 6. Исследование частотных характеристик двухполосников.....	63
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	70
Приложение 1. Варианты задания практического занятия 1.....	70
Приложение 2. Варианты задания практического занятия 2.....	77
Приложение 3. Варианты задания практического занятия 3.....	84
Приложение 4. Варианты задания практического занятия 4.....	90
Приложение 5. Варианты задания практического занятия 5.....	94
Приложение 6. Варианты задания практического занятия 6.....	98
Приложение 7. Варианты задания практического занятия 7.....	104
Список литературы.....	112

Учебное издание

БОЛЬШАКОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ

ВЕКШИНА ТАТЬЯНА ВИКТОРОВНА

КОРИНЕЦ ЕКАТЕРИНА МИХАЙЛОВНА

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Подписано в печать 09.02.2024. Формат 60×84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 6,63. Тираж 100. Заказ 22.

Выпущено ООО «Медиапапир»
с готового оригинал-макета, предоставленного заказчиком.
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 28, литера А,
помещ. 3-н, ком. 184, 185, 188, 192, 193, 194. Тел.: (812) 987-75-26
mediapapir@gmail.com www.mediapapir.com www.mediapapir.ru