

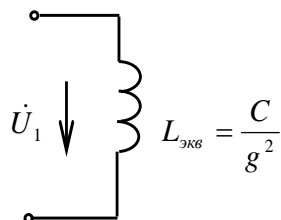
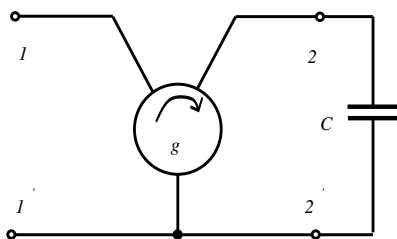
Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям по дисциплине  
" Электротехника и электроника "  
для студентов направления подготовки 11.03.03  
«Конструирование и технология электронных средств», (про-  
филь «Проектирование и технология радиоэлектронных  
средств») всех форм обучения



Воронеж 2021

УДК  
ББК

**Составители:**  
асс. А.С. Костюков  
д-р техн. наук А.В. Башкиров

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Электротехника и электроника» для студентов направления подготовки 11.03.03. «Конструирование и технология электронных средств», (профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А.С. Костюков, А.В. Башкиров, Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 38 с.

В работе излагается материал, необходимый для получения практических навыков при решении задач по дисциплине " Электротехника и электроника". Каждое практическое занятие содержит контрольные вопросы и задачи по теме, а также примеры решения типовых заданий.

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе MS Word 2007 и содержатся в файле ELTEN2.pdf

Табл. 1. Ил.27. Библиогр.: 2 назв.

**УДК**  
**ББК**

**Рецензент** - О. Ю. Макаров, д-р техн. наук, проф.  
кафедры конструирования и производства  
радиоаппаратуры ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

### Тема занятия : « Линейные цепи при гармоническом воздействии »

#### Домашнее задание

Изучить по конспекту лекций и литературе материал по следующим пунктам:

1. Классификация электрических цепей. Линейные, нелинейные и параметрические цепи. Цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами.

2. Идеализированные пассивные элементы : сопротивление, индуктивность и емкость. Компонентные уравнения для индуктивности и емкости: источники напряжения и тока.

3. Понятие о схемах электрических цепей: структурные, функциональные, принципиальные и эквивалентные (расчетные) схемы.

4. Основные определения, относящиеся к электрической схеме замещения (эквивалентной схеме): ветвь, узел, контур, граф.

5. Гармоническое колебание. Средневыпрямленное значение и среднеквадратическое значение гармонических функций.

6. Представление гармонических колебаний в виде проекций вращающихся векторов. Векторные диаграммы.

7. Гармонический ток в сопротивлении, индуктивности и емкости. Последовательное соединение  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Активное, реактивное и полное сопротивления.

8. Параллельное соединение  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Активная, реактивная и полная проводимости цепи.

9. Мощность в цепи переменного тока: средняя, реактивная, полная.

10. Согласование в цепи переменного тока. Коэффициент полезного действия.

#### Решить задачи:

1.1. Показать, что величина  $RC$ ,  $L/R$  и  $\sqrt{LC}$  имеют размерность времени, а величина  $\sqrt{L/C}$  - размерность сопротивления.

1.2. Используя векторное представление гармонического колебания, вычтеть напряжение  $5 \sin \omega t$  из напряжения  $10 \cos \omega t$ .

Ответ:  $11,2 \cos(\omega t + 26^{\circ}30')$ .

1.3. На зажимах цепи, состоящей из последовательно соединенных сопротивления  $R = 50$  Ом и индуктивности  $L = 0,1$  Гн, задано напряжение  $u = \sqrt{2} 100 \cos \omega t$ . Частота  $f = 50$  Гц. Вычислить полное сопротивление цепи и действующие значения напряжения на  $R$  и  $L$ ; найти выражение для гармонического тока.

Ответ :  $59$  Ом;  $85$  В;  $53,4$  В.

$$i = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cos(\omega t - 32^{\circ}10') \text{ А.}$$

1.4. Через цепь, из параллельно соединенных сопротивления ( $R = 8,33$  Ом) и индуктивности ( $L = 6,36$  мГн), проходит ток  $0,141 \cos \omega t$  А; частота равна  $500$  Гц. Определить напряжение на параллельных ветвях.

Ответ :  $u(t) = 1,1 \cos(\omega t + 22^{\circ}36')$  В.

1.5. В цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов  $R$ ,  $C$ ,  $L$ , определить действующее суммарное напряжение на всех элементах, если  $U_R = 2$  В,  $U_C = 1$  В,  $U_L = 1$  В. Какая величина угла сдвига фазы между током и напряжением? Нарисовать векторную диаграмму.

1.6. В цепи, состоящей из параллельно соединенных элементов  $R$ ,  $C$ ,  $L$ , определить действующее значение суммарного тока, если  $I_R = 1$  А,  $I_L = 3$  А,  $I_C = 2$  А. Какая величина угла сдвига фазы между током и напряжением? Нарисовать векторную диаграмму.

1.7. Используя условия задачи 1.3, определить среднюю мощность, отдаваемую источником напряжения в цепи.

**Подготовиться к ответам на вопросы:**

1. Какие электрические цепи называются линейными?
2. Какова связь между мгновенными значениями тока и напряжения на индуктивности?
3. Какова связь между мгновенными значениями тока и напряжения на емкости?
4. Как обозначаются на схемах идеальные и реальные источники напряжения и тока гармонической формы?
5. Сформулируйте определение электрической цепи. Что такое ветвь, узел и контур электрической цепи?
6. Как формулируются законы Кирхгофа? Приведите примеры для конкретных схем.
7. Какое колебание называется гармоническим, какими функциями времени оно выражается?
8. Назовите основные параметры гармонического колебания. В чем разница между мгновенными, амплитудными и действующими значениями напряжения и тока?
9. Для каких значений напряжения и тока справедлив закон Ома и справедливы законы Кирхгофа?
10. Как относятся между собой фазы тока и напряжения на сопротивлении, индуктивности и емкости?
11. Как определяется гармоническое колебание в виде вектора?
12. Изобразите графически в виде векторов два гармонических колебания, сдвинутых относительно друг друга на определенную фазу. Дайте интерпретацию в виде изображения на графике временных функций.
13. Напишите выражение для напряжения на индуктивности  $L$   $u_L(t)$  при  $i_L = I_m \cos(\omega t + \varphi_i)$ .
14. Напишите выражение для тока через конденсатор  $C$   $i_C(t)$  при напряжении  $u_C = U_m \cos(\omega t + \varphi_i)$ .
15. Что такое реактивное сопротивление для индуктивности и емкости? Как зависит оно от частоты?
16. Чему равно полное сопротивление  $Z$  ветви из последовательно соединенных элементов  $R$ ,  $L$  и  $C$ ?

17. Изобразите векторную диаграмму для последовательно соединенных элементов R, L и C, приняв за исходный вектор общего тока. Определите в виде формулы суммарное действующее напряжение на R, L и C.

18. Дайте определение мгновенной, средней и реактивной мощности в цепи переменного тока. Как определяется полная мощность?

19. Сформулируйте условия согласования источника и нагрузки в цепи переменного тока. Как определяется коэффициент полезного действия?

### Примеры решения задач

1.8. Показать, что величина  $R^2C$  имеет размерность индуктивности.

Решение

Воспользуемся формулой  $u_L = L \frac{di}{dt}$  и определим размерность в основных единицах, т.е.

$$[L] = \left[ \frac{u_L dt}{di} \right] = \left[ \frac{B \cdot C}{A} \right].$$

Определим теперь размерность величины  $R^2C$  и сопоставим ее с размерностью L. Используя формулу  $i = C \frac{du}{dt}$  и опре-

деляя размерность C, т.е.  $[C] = [i dt/du_c] = \left[ \frac{A \cdot C}{B} \right]$ , получим, что

$$[R^2C] = \left[ \text{Ом}^2 \cdot \frac{A \cdot C}{B} \right] = \left[ \frac{\text{Ом} \cdot A \cdot C}{A} \right] = \left[ \frac{B \cdot C}{A} \right].$$

1.9. К цепи, состоящей из последовательно соединенных сопротивления  $R = 50$  Ом и катушки индуктивности  $L = 50$  мГн, подключен источник э.д.с.  $e = 100 \cos 10^3 t$  В.

Определить ток  $i(t)$ .

Решение

Определим амплитудное значение тока в цепи

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{100}{\sqrt{50^2 + (10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3})^2}} = 1,41 \text{ А.}$$

Разность фаз  $\varphi$  между фазой напряжения  $\varphi_e$  и фазой тока  $\varphi_i$ , т.е.  $\varphi = \varphi_e - \varphi_i$  определим по формуле

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R} = \arctg \frac{10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{50} = 45^\circ.$$

Фаза тока  $\varphi_i$  определяется как  $\varphi_i = \varphi_e - \varphi = 0 - 45^\circ$ . С учетом этого записываем выражение для мгновенного выражения тока в цепи

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_e) = 1,41 \cos(10^3 t - 45^\circ).$$

Это означает, что фаза тока в цепи отстает от фазы напряжения на  $45^\circ$ .

1.10. К цепи, состоящей из последовательно соединенных сопротивления  $R = 5$  Ом, индуктивности  $L = 0,1$  Гн и емкости  $C = 0,01$  мкФ, приложено напряжение  $U = 10 \cos(314 t + 20^\circ)$  В.

Найти мгновенное значение тока в цепи, а также действующие значения напряжений на индуктивности  $U_L$ , емкости  $U_C$  и сопротивлении  $U_R$ .

Решение

Определим максимальное значение тока в цепи

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{10}{\sqrt{5^2 + \left(31,4 \cdot 0,1 - \frac{1}{3,14 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{10}{\sqrt{25 + (31,4 - 318,5)^2}} = 3,48 \cdot 10^{-2} \text{ A} = 34,8 \text{ mA}.$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением определим по формуле

$$\varphi = \arctg \frac{x}{R} = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \arctg \frac{31,4 \cdot 0,1 - \frac{1}{3,14 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6}}}{R} =$$

$$= \arctg \frac{31,4 - 318,5}{5} = -89^\circ.$$

Фазу тока в цепи определим по формуле  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ , т.е.

$$\varphi_i = \varphi_u - \varphi = 20^\circ - (-89^\circ) = 109^\circ.$$

Подставляя полученное значение фазы тока в выражение для мгновенного значения тока, получим, что

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_i) = 34,8 \cos(314 t + 109^\circ) \text{ mA}.$$

Действующие значения напряжений на сопротивлении, индуктивности и емкости определяются как

$$U_R = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot R = \frac{3,48 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{2}} \cdot 5 = 0,123 \text{ B},$$

$$U_L = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \omega L = \frac{3,48 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{2}} \cdot 314 \cdot 0,1 = 0,755 \text{ B},$$

$$U_C = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\omega C} = \frac{3,48 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{3,14 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6}} = 7,86 \text{ B}.$$

1.11. Напряжение на зажимах сопротивления  $R=3,63$  Ом и индуктивности  $L = 0,02$  Гн, соединенных параллельно  $u = \sqrt{2} \cdot 120 \cos(314t - \pi/3)$ . Вычислить полную проводи-



мость цепи и действующие значения токов в R и L. Записать выражение для суммарного гармонического тока.

Решение

Вычислим полную проводимость цепи

$$y = \sqrt{g^2 + b_L^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{3,63}\right)^2 + \left(\frac{1}{314 \cdot 0,02}\right)^2} = 0,318 \text{ Ом.}$$

Определим действующие значения токов в R и L, т.е.

$$I_R = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot g = \frac{\sqrt{2} \cdot 120}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{3,63} = 33,05 \text{ А,}$$

$$I_L = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot b_L = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\omega L} = \frac{\sqrt{2} \cdot 120}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{314 \cdot 0,02} = 19,1 \text{ А.}$$

Для записи выражения суммарного гармонического тока определим вначале угол сдвига фаз между напряжением и током

$$\varphi = \arctg \frac{b_L}{g} = \arctg \frac{\frac{1}{\omega L}}{\frac{1}{R}} = \arctg \frac{\frac{1}{314} \cdot 0,02}{\frac{1}{3,63}} = 30^\circ.$$

Из выражения  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$  определим фазу тока  $\varphi_i$ , т.е.

$$\varphi_i = \varphi_u - \varphi = -\pi/3 - \pi/6 = -\pi/2.$$

Максимальное значение суммарного тока будет равно

$$I_m = U_m Y = \sqrt{2} \cdot 120 \cdot 0,318 = 53,8 \text{ А.}$$

И окончательно, выражение для суммарного гармонического тока с учетом предыдущих вычислений запишем в виде

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_i) = 53,8 \cos(\omega t - \pi/2) \text{ А.}$$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

### Тема занятия: « Применение метода комплексных амплитуд к расчету электрических цепей»

#### Домашнее задание

Изучите по конспекту лекций и литературе материал по следующим пунктам:

1. Запись комплексных чисел. Вращающийся вектор на комплексной плоскости. Основные правила записи гармонического сигнала в комплексной форме. Переход от комплексной записи к обычной.

2. Законы Ома для  $L$ ,  $C$ ,  $R$  в комплексной форме. Понятие комплексного сопротивления цепи и его отличие от обычного сопротивления.

3. Закон Кирхгофа в комплексной форме. Последовательное и параллельное соединение  $R$ ,  $L$ ,  $C$ .

4. Комплексная форма записи мощности в цепи.

#### Решить задачи:

2.1. Произвести вычисления:

а)  $10e^{j30} + 5e^{j60}$ , б)  $10e^{j30} - 5e^{j60}$ , в)  $(8,66 + j5)(3,53 + j353)$ , г)  $(8,667 + j5) : (8,5 + j4,33)$ , д)  $(5 + j3)^2$ .

2.2. Используя формулу Эйлера  $e^{\pm j\varphi} = \cos\varphi \pm j\sin\varphi$ , показать что  $j = e^{j\pi/2}$ ,  $-j = e^{-j\pi/2}$ ,  $-1 = e^{\pm j\pi}$ .

2.3. Используя комплексный метод расчета, вычесть напряжение  $5\sin\omega t$  из напряжения  $10\cos\omega t$ .

Ответ:  $u(t) = 11,2\cos(\omega t + 26,6^\circ)$ .

2.4. Определить  $u(t)$ , если комплексная амплитуда напряжения задана в виде  $U_m = -12 + j10$  В.

Ответ :  $u(t) = 15,6\cos(\omega t + 140,2^\circ)$ .

2.5. Напряжение изменяется по закону

$u(t) = -10\cos(\omega t + \pi/4)$ . Записать временную зависимость напряжения в комплексной форме.

Ответ:  $U_m = 10e^{-j3\pi/4}$ .

2.6. К цепи, состоящей из  $R = 20$  Ом,  $L = 100$  мГн и  $C = 50$  мкФ, соединенных последовательно, приложено напряжение  $u = 14,14\sin 377$  В.

Вычислить комплексные ток и напряжение на R, L, C.

Ответ:  $I_m = 0,561e^{-j52,6^\circ}$  А,  $U_{mR} = 11,2 e^{-j52,6^\circ}$  В,  
 $U_{mL} = 21,15e^{j37,4^\circ}$ ,  $U_{mC} = 29,7 e^{-j142,6^\circ}$  В.

2.7. Вычислить комплексное значение тока в цепи источника напряжения в схеме

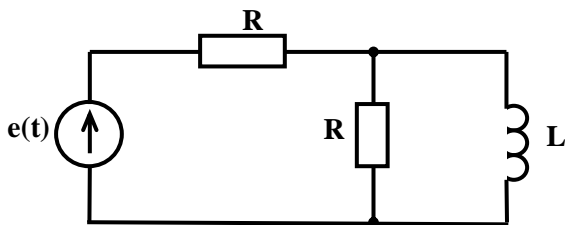


Рис. 2.1

9

с учетом, что  $e(t) = 15\cos 314t$  В,  $R = 10$  Ом,  $L = 0,1$  Гн.

Ответ:  $I_m = 1,59e^{-j17,7^\circ}$  А.

### Подготовиться к ответам на вопросы:

1. Из каких частей состоит комплексное число А?
2. Какие формы представления комплексных чисел известны? Какая из форм записи наиболее удобна при сложении, вычитании, умножении и делении комплексных чисел?
3. Как перейти от алгебраической формы записи комплексного числа к показательной форме?
4. Запишите правила перехода от временной формы записи гармонического сигнала к комплексной.
5. Поясните понятие «комплексная амплитуда гармонического колебания». Какую она содержит в себе информацию?

6. Поясните понятие «оператор вращения». Какую информацию он содержит?

7. Сформулируйте правило записи временной зависимости гармонического колебания по известной комплексной амплитуде.

8. Как используя метод комплексных амплитуд, найти сумму (разность) двух гармонических колебаний?

9. Что такое «комплексное сопротивление» и «комплексная проводимость» цепи?

10. Дайте физическую интерпретацию величины  $j$  в комплексном сопротивлении индуктивности.

11. Дайте физическую интерпретацию величины  $-j$  в комплексном сопротивлении емкости.

12. Справедливы ли законы Кирхгофа для комплексных амплитуд?

13. Дайте определение понятию «комплексная мощность». Каков физический смысл этого понятия?

### Примеры решения задач

2.8. Определить  $i(t)$ , если комплексная амплитуда тока задана в виде  $I_m = -10 - j5$  А.

Решение.

Используя равенство  $-1 = e^{\pm j\pi}$ , представим комплексные значения тока как

$$\begin{aligned} I_m &= -(10 + j5) = e^{-j\pi} \sqrt{10^2 + 5^2} \cdot e^{j \arctg \frac{5}{10}} = \\ &= e^{-j\pi} \cdot 11,2 \cdot e^{j26,6^\circ} = 11,2 e^{j(26,6^\circ - 180^\circ)} = 11,2 e^{-j153,4^\circ}. \end{aligned}$$

Для записи  $i(t)$  воспользуемся правилом перехода от комплексной формы записи гармонического колебания к временной, т.е.

$$i(t) = \operatorname{Re}\{I_m e^{-j\omega t}\},$$

таким образом, имеем, что

$$i(t) = \operatorname{Re}\{11,2 e^{-j153,4^\circ} e^{j\omega t}\} = \operatorname{Re}\{11,2 e^{j(\omega t - 153,4^\circ)}\} =$$

$$= \operatorname{Re}\{11,2 \cdot \cos(\omega t - 153,4^\circ) + j \sin(\omega t - 153,4^\circ)\} = 11,2(\omega t - 153,4^\circ)$$

$$\text{Ответ: } i(t) = 11,2(\omega t - 153,4^\circ).$$

2.9. Сложить токи  $i_1 = 10 \sin \omega t$  и  $i_2 = 10 \cos(\omega t + \pi/4)$ .

Решение.

Представляем выражения для токов в комплексной форме

$$i_1 = 10 \cos(\omega t - 90^\circ), I_{1m} = 10e^{-j90^\circ},$$

$$I_{1m} = 10 \cos 90^\circ - j10 \sin 90^\circ = -j10^\circ,$$

$$i_2 = 10 \cos(\omega t + \pi/4), I_{2m} = 10e^{j45^\circ},$$

$$I_{2m} = 10 \cos 45^\circ + j10 \sin 45^\circ = 7,07 + j7,07.$$

Произведем сложение токов

$$I_m = I_{1m} + I_{2m} = -j10 + 7,07 + j7,07 = 7,07 - j2,97 =$$

$$= \sqrt{7,07^2 + 2,97^2} \cdot e^{-j \arctg 2,97/7,07} = 7,67e^{-j22,8^\circ}.$$

Преобразуем комплексную запись тока в тригонометрическую

$$i(t) = \operatorname{Re}\{7,67e^{-j22,8^\circ} \cdot e^{j\omega t}\} = \operatorname{Re}\{7,67e^{j(\omega t - 22,8^\circ)}\} =$$

$$= \operatorname{Re}\{7,67 \cos(\omega t - 22,8^\circ) + j7,67 \sin(\omega t - 22,8^\circ)\} = 7,67 \cos(\omega t - 22,8^\circ).$$

$$\text{Ответ: } 7,67 \cos(\omega t - 22,8^\circ).$$

2.10. Вычислить комплексное значение тока в цепи источника напряжения в схеме с учетом, что  $e(t) = 20 \cos 314t$  В,  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 100$  Ом,  $C = 100$  мкФ.

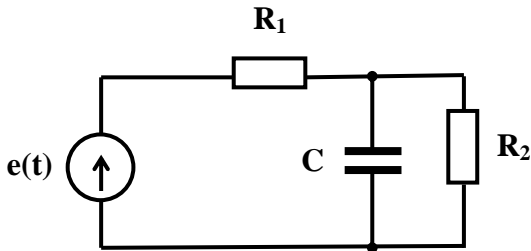


Рис. 2.2

## Решение

Представим  $e(t)$  в комплексной форме, что с учетом нулевой начальной фазы выразится как  $E = 20$  В.

Вычислим комплексное сопротивление

$$\begin{aligned} Z &= R_1 + \frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C}} = 10 + \frac{100 \cdot \frac{1}{j314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}}{100 + \frac{1}{j314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} = \\ &= 10 + \frac{-j3184,7}{100 - j31,85} = 10 + 9,2 - j28,9 = 19,2 - j28,9. \end{aligned}$$

12

Определяем комплексное значение тока

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \frac{\dot{E}}{Z} = \frac{20}{19,2 - j28,9} = 0,319 + j0,48 = \\ &= \sqrt{0,39^2 + 0,48^2} \cdot e^{j \arctg \frac{0,48}{0,319}} = 0,57 e^{j56,4^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

Ответ:  $\dot{I} = 0,57 e^{j56,4^\circ}$  А.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

**Тема занятия: « Эквивалентные соединения и методы расчета сложных электрических цепей»**

### Домашнее задание

Изучить по конспекту лекций и литературе материал по следующим пунктам:

1. Эквивалентные соединения.
2. Эквивалентные источники напряжения и тока.

3. Метод наложения.
4. Расчет электрических цепей с помощью теоремы об эквивалентном источнике напряжения.
5. Общий метод расчета сложных электрических цепей.
6. Метод контурных токов.
7. Метод узловых напряжений.

### Решить задачи

3.1. Сопротивление  $R=2$  Ом и емкость  $C = 0,191$  мкФ соединены параллельно. Найти эквивалентную схему с последовательным соединением  $R$  и  $C$  при частоте  $f = 1$  МГц.

Ответ:  $R = 0,296$  Ом;  $C = 0,224$  мкФ.

3.2. Два генератора, имеющих одинаковую частоту, соединены параллельно по схеме

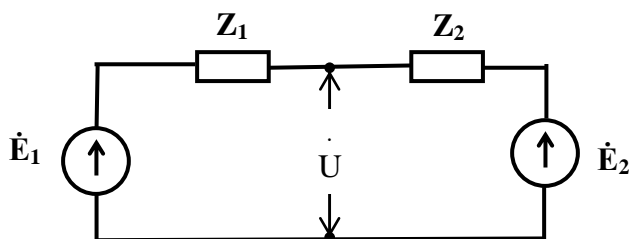
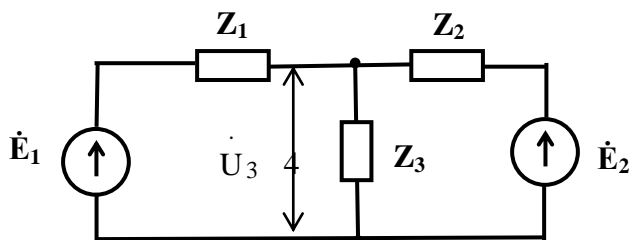


Рис. 3.1

Используя эквивалентное преобразование источника напряжения в источник тока, напряжение  $\dot{U}$  на параллельно соединенных генераторах.

Ответ:  $\dot{U} = \frac{\dot{E}_1 Z_2 + \dot{E}_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$ .

3.3. В схеме  $\dot{E}_1=120$  В,  $\dot{E}_2=110$  В,  $Z_1 = Z_2 = Z_3=0,4+j0,6$  Ом.



### Рис. 3.2

Определить напряжение  $U_3$  используя:

- а) метод наложения,
- б) теорему об эквивалентном источнике напряжения,
- в) метод контурных токов.

Составить систему уравнений для определения токов в ветвях общим методом и методом узловых потенциалов.

#### **Подготовиться к ответам на вопросы:**

1. Сформулируйте условия, которые необходимо выполнить при замене одного участка цепи другим, эквивалентным первому.

2. Как перейти от последнего соединения элементов к эквивалентному параллельному соединению?

3. Как перейти от параллельного соединения элементов к эквивалентному последовательному соединению?

4. Объясните, почему эквивалентный переход от параллельного соединения к последовательному и наоборот верен только для одной и той же частоты  $f$ ?

5. Объясните, что такое напряжение холостого хода  $U_{ХХ}$  и сопротивление короткого замыкания  $Z_{кз}$  при определении тока в ветви по теореме об эквивалентном источнике напряжения?

6. Сформулируйте теорему об эквивалентном источнике напряжения.

7. Какой принцип теории электрических линейных цепей используется при расчете методом наложения?

8. Сформулируйте порядок определения тока в ветви при расчете методом наложения.



9. Дайте определения понятиям : ветвь, узел, контур, граф.

10. Сформулируйте определение для первого и второго законов Кирхгофа.

11. Как определить число независимых узлов и контуров для расчета цепи по общему методу?

12. Поясните порядок составления уравнений по общему методу расчета электрической цепи.

13. Чем отличается метод контурных токов от общего метода?

14. Поясните порядок составления уравнений по методу контурных токов.

15. Какой закон Кирхгофа используется в методе узловых потенциалов?

### Примеры решения задач

3.4. В схеме, имеющей  $C=10$  мкФ,  $R=10$  Ом,  $L=100$  мГн, вычислить комплексное сопротивление цепи для  $\omega = 377$  рад/с, используя правило эквивалентных преобразований.

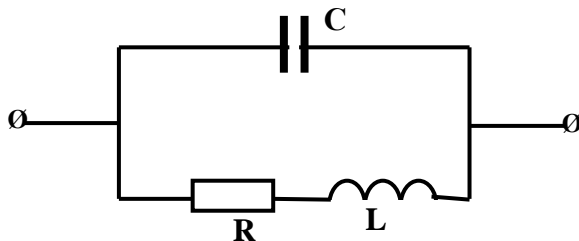


Рис. 3.3

### Решение

Цепь, состоящую из последовательно соединенных  $R$  и  $L$ , представим эквивалентной цепью из параллельно соединенных элементов и определим  $g$  и  $b$  этой цепи

$$\begin{aligned}
 Y &= \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jx_L} = \frac{R - jx_L}{(R + jx_L)(R - jx_L)} = \frac{R - jx_L}{R^2 + x_L^2} = \\
 &= \frac{R}{R^2 + x_L^2} \cdot j \frac{x_L}{R^2 x_L^2} = g - jb.
 \end{aligned}$$

Определим теперь общую проводимость цепи

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{общ}} &= j\omega C + g - jb = j\omega C + \frac{R^2}{R^2 + x_L^2} - j \frac{x_{LR}}{R^2 + x_L^2} = j377 \cdot 10 \cdot 10^{-6} + \\
 &+ \frac{10}{10^2 + (377 \cdot 100 \cdot 10^{-3})^2} - j \frac{377 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{10^2 + (377 \cdot 100 \cdot 10^{-3})^2} = 0,00657 - j0,021 \text{ См.}
 \end{aligned}$$

Комплексное сопротивление цепи находим как

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{1}{\dot{Y}} = \frac{1}{0,00657 - j0,021} = \frac{0,00657 + j0,021}{(0,00657 + j0,021)(0,00657 - j0,021)} = \\
 &= \frac{0,00657 + j0,021}{0,00657^2 + 0,021^2} = 13,5 + j43,4 \text{ Ом.}
 \end{aligned}$$

Ответ:  $\dot{Z} = 13,5 + j43,4 \text{ Ом.}$

3.5. Сопротивление  $R=10 \text{ Ом}$  и индуктивность  $L=10 \text{ мГн}$  соединены параллельно. Найти эквивалентную схему с последовательным соединением  $R$  и  $L$  при частоте  $f= 1000 \text{ Гц}$ .

Решение

Записываем выражение для комплексного сопротивления, т.е.

$$Z = \frac{1}{\dot{Y}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{j2\pi fL}} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1}{j6,28 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}} = \frac{1}{0,1 - j\frac{1}{62,8}} =$$

$$= \frac{1}{0,1 + j1,6 \cdot 10^{-2}} = \frac{0,1 + j1,6 \cdot 10^{-2}}{0,1 + (1,6 \cdot 10^{-2})^2} = 9,75 + j1,56 \text{ Ом.}$$

Таким образом, мы получим, что  $R=10$  Ом и  $\omega L=1,56$  Ом.

Определяем, что  $L = \frac{1,56}{6,28 \cdot 10^{-3}} = 2,48 \cdot 10^{-4}$  Гн.

В итоге получаем, что эквивалентная схема с последовательным соединением состоит из  $R=9,75$  Ом и  $L=2,48 \cdot 10^{-4}$  Гн= $=0,248$  мГн.

Ответ:  $R=9,75$  Ом,  $L=0,248$  мГн.

3.6. В схеме изменить источники напряжения на эквивалентные источники тока, если  $E_1=10$  В,  $E_2=30$  В,  $Z_1 = 20+j10$  Ом,  $Z_2 = 5+j4$  Ом.

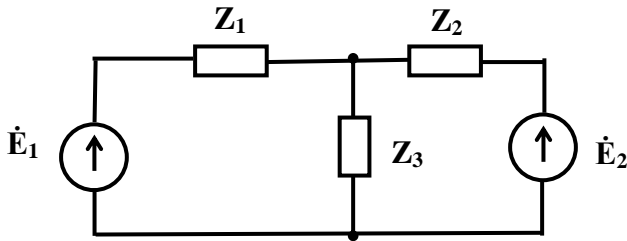


Рис. 3.4

Решение

Произведем замену источников напряжения на эквивалентные источники тока, перерисовав схему

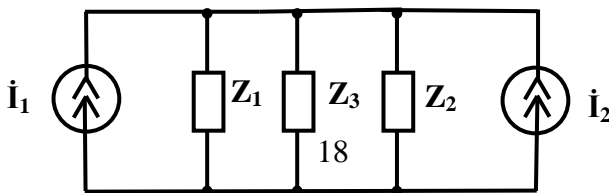


Рис. 3.5

Значения величин токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  определим как

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_1} = \frac{10}{20 + j10} = 0,4 - j0,2 \text{ А,}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_2} = \frac{30}{5 + j4} = 3,66 - j2,92 \text{ А.}$$

Для обратного перехода от источника тока к эквивалентным источникам напряжения необходимо, перерисовав схему, вычислить значения  $E$  по формуле

$$\dot{E} = \dot{I} \cdot Z.$$

3.7. Используя теорему об эквивалентном источнике напряжения, определить ток  $I$  в сопротивлении  $Z_5$  для схемы (рис. 3.6).

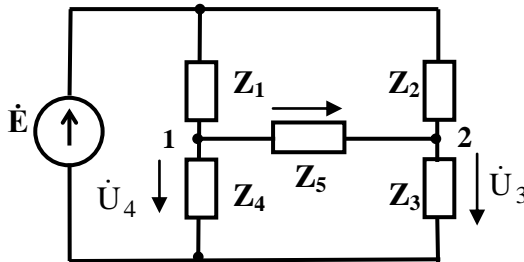


Рис. 3.6

Решение

Определим напряжение холостого хода  $U_{xx}$  между точками 1 и 2, разорвав ветвь

$$\dot{U}_{xx} = \dot{U}_4 - \dot{U}_3 = Z_4 \frac{\dot{E}}{Z_1 + Z_4} - \frac{\dot{E}}{Z_2 + Z_3}.$$

Сопротивление короткого замыкания  $Z_{кз}$  между точками 1 и 2, определим из схем (рис. 3.7, рис. 3.8), т.е.

$$Z_{кз} = \frac{Z_1 \cdot Z_4}{Z_1 + Z_4} + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}.$$

Ток через  $Z_5$  определим в соответствии с теоремой об эквивалентном источнике напряжения по формуле

$$\dot{i}_5 = \frac{\dot{U}_{кз}}{Z_{кз} + Z_5}.$$

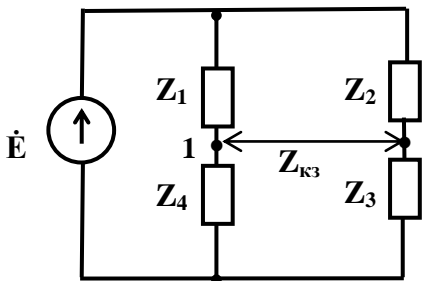


Рис. 3.7

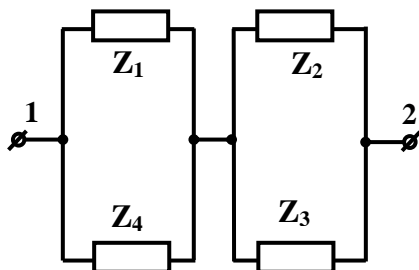


Рис. 3.8

3.8. Методом наложения определить напряжение на ветви  $Z_3$  в схеме

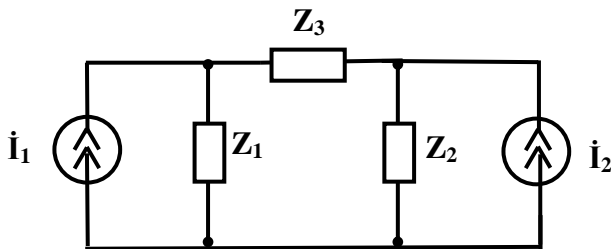


Рис. 3.9

Решение

Разрываем цепь источника тока  $I_2$  и определяем частичный ток  $\dot{i}'_3$  в  $Z_3$  от источника тока  $\dot{I}_1$  (рис. 3.10), преобразовав его в эквивалентный источник напряжения  $\dot{E}_1$  (рис. 3.11).

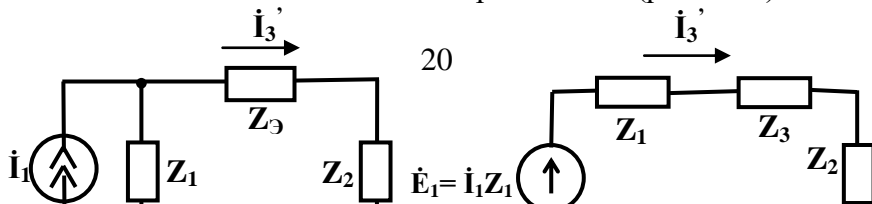
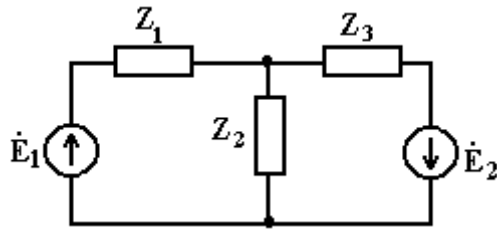


Рис. 3.10

Рис. 3.11

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_1}{Z_1 + Z_2 + Z_3} = \frac{\dot{I}_1 Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_3}.$$

Разрываем цепь источника  $\dot{I}_1$  и определим частичный ток  $\dot{I}_3''$  в  $Z_3$  от источника  $\dot{I}_2$  (рис. 3.12), преобразовав его в эквива-



лентный источник напряжения  $\dot{E}_2$  (рис. 3.13), т.е.

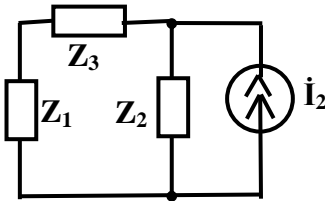


Рис. 3.12

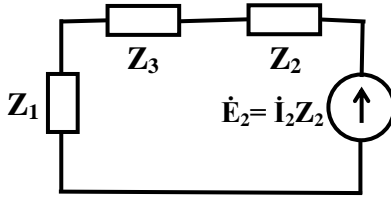


Рис. 3.13

$$\dot{I}_3'' = \frac{\dot{E}_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} = \frac{\dot{I}_3 Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3}.$$

Определим ток  $\dot{I}_3$  в  $Z_3$  с учетом направлений э.д.с.  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$  как

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_3 - \dot{I}''_3 = \frac{\dot{I}_1 Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_3} = \frac{\dot{I}_2 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3} = \frac{\dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3}.$$

3.9. Используя метод контурных токов, определить токи в ветвях схемы (рис. 3.14).

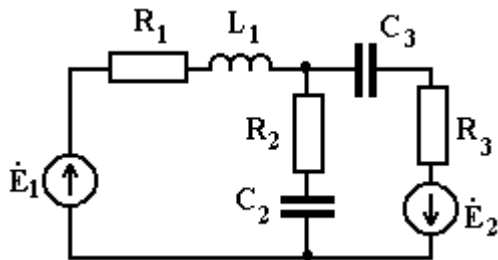


Рис. 3.14

$\dot{E}_1 = 10 \text{ В}$ ,  $\dot{E}_2 = 20 \text{ В}$ ,  $L_1 = 10 \text{ мГн}$ ,  $C_1 = C_2 = 100 \text{ мкФ}$ ,  
 $\omega = 10 \text{ рад/сек}$ ,  $R_1 = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 10 \text{ Ом}$ .

Решение

Представим ветви в схеме (рис. 3.14) в виде комплексных сопротивлений  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  (рис. 3.15).

Рис. 3.15

Определим значения комплексных сопротивлений  $Z_1, Z_2, Z_3$ :

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 = 50 + j10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 60 + j10,$$

$$Z_2 = R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} = 5 + \frac{1}{j10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 5 - j10,$$

$$Z_3 = R_3 + \frac{1}{j\omega C_3} = 10 + \frac{1}{j10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 10 - j10.$$

Составим систему уравнений по методу контурных токов, приняв за контурные токи:  $\dot{I}_1$  в контуре  $\dot{E}_1$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $\dot{I}_2$  в контуре  $\dot{E}_2$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  (рис. 3.16).

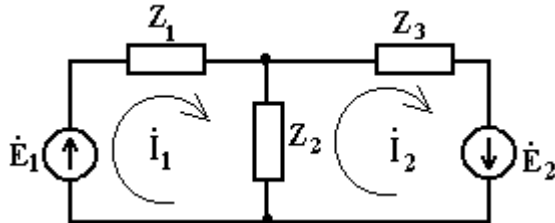


Рис. 3.16

$$\begin{cases} \dot{I}_1 (Z_1 + Z_2) - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{E}_1 \\ \dot{I}_2 (Z_2 + Z_3) - \dot{I}_1 Z_2 = \dot{E}_2. \end{cases}$$

Перепишем систему уравнений в виде

$$\begin{cases} \dot{I}_1 (Z_1 + Z_2) - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{E}_1 \\ - \dot{I}_1 Z_2 + \dot{I}_2 (Z_2 + Z_3) = \dot{E}_2. \end{cases}$$

Решим эту систему уравнений, используя метод Крамера, записав матрицу сопротивлений в виде

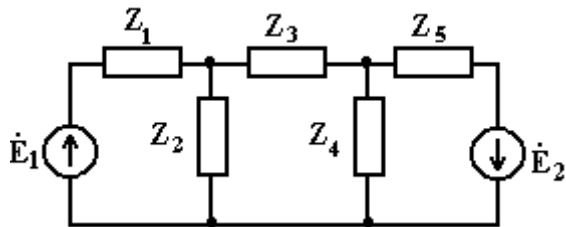
$$\begin{vmatrix} (Z_1 + Z_2) & (-Z_2) \\ (-Z_2) & (Z_2 + Z_3) \end{vmatrix}$$

Подставляя значения сопротивлений  $Z_1, Z_2, Z_3$  в матрицу, получим

$$\begin{vmatrix} (65) & (-5 + j10) \\ (-5 + j10) & (15 - j20) \end{vmatrix}.$$

Найдем определитель матрицы  $\Delta$

|||



$$\Delta = \begin{vmatrix} (65) & (-5 + j10) \\ (-5 + j10) & (15 - j20) \end{vmatrix} = 1050 - j1200.$$

Находим определители  $\Delta \dot{I}_1$  и  $\Delta \dot{I}_2$



$$\Delta \dot{I}_1 = \left\| \begin{array}{cc} \dot{E}_1 & (-Z_2) \\ \dot{E}_2 & (Z_2 + Z_3) \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} (10) & (-5 + j10) \\ (20) & (15 - j20) \end{array} \right\| = 250 - j400,$$

$$\Delta \dot{I}_2 = \left\| \begin{array}{cc} (Z_1 + Z_2) & \dot{E}_1 \\ (-Z_2) & \dot{E}_2 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} (65) & (10) \\ (-5 + j10) & (20) \end{array} \right\| = 1350 - j100.$$

В соответствии с формулами Крамера находим контурные токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , т.е.

$$\dot{I}_1 = \frac{\Delta \dot{I}_1}{\Delta} = \frac{250 - j400}{1050 - j1200} = 0,292 - j0,047 \text{ A},$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\Delta \dot{I}_2}{\Delta} = \frac{1350 - j100}{1050 - j1200} = 1,258 + j0,144 \text{ A}.$$

Ток в ветви  $Z_2$  найдем как алгебраическую сумму токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , т.е.

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_2 - \dot{I}_1 = 1,258 + j0,144 - 0,292 + j0,047 = 0,966 + j0,191 \text{ A}.$$

Таким образом получаем, что

$$\dot{I}_{Z_1} = \dot{I}_1 = 0,292 - j0,047 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{Z_2} = \dot{I}_2 = 1,258 + j0,144 \text{ A},$$

$$I_{Z_2} = \dot{I}_2 - \dot{I}_1 = 0,966 + j0,191 \text{ A}.$$

3.10. Составить систему уравнений по методу узловых напряжений для схемы

Рис. 3.17

Для составления системы уравнений по методу узловых напряжений используется только первый закон Кирхгофа. В

схеме должны присутствовать только источники тока. Преобразуем схему с содержанием только источников тока, т.е.

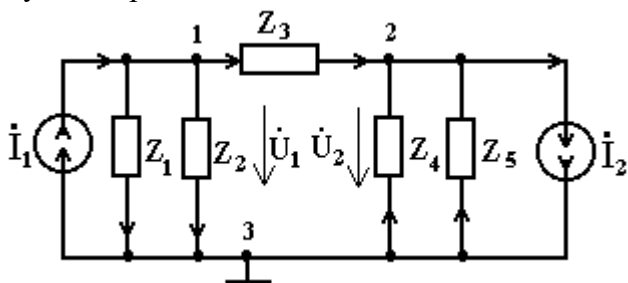


Рис. 3.18

Величины токов определим из выражений

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{Z_1}, \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_5}.$$

Зададимся также направлениями токов в ветвях, ориентируясь направлениями источников токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  (стрелки на схеме). Из трех узлов схемы узел 3 выберем за базовый ( $\perp$ ) и относительно его зададимся узловыми напряжениями  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ , стрелки которых показывают их направление от узлов 1 и 2 к узлу 3. Задача расчета цепи состоит в определении  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ , по которым можно найти токи во всех ветвях. Применяя первый закон Кирхгофа, составим два уравнения для узлов 1 и 2, используя понятие проводимости ветвей  $Y=1/Z$

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dot{U}_1 \cdot \dot{Y}_1 - \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_2 - (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \dot{Y}_3 = 0, \\ -\dot{I}_2 + (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \cdot \dot{Y} + \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_4 + \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_5 = 0. \end{cases}$$

После преобразования (раскроем скобки и приведем подобные члены) получим

$$\begin{cases} \dot{U}_1(\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3) - \dot{U}_2 \dot{Y}_3 = \dot{I}_1, \\ \dot{U}_1 \cdot \dot{Y}_3 + \dot{U}_2(\dot{Y}_4 + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_5) = \dot{I}_2. \end{cases}$$

Для решения системы уравнений можно использовать формулу Крамера, как в задаче 3.9, и далее, например, приме-

нить программу для вычисления определителей на основе прикладного пакета Mathcad.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

**Тема занятия : « Частотно – избирательные цепи и колебательные контуры»**

### Домашнее задание

Изучить по конспекту лекций и литературе материал по следующим пунктам:

1. Комплексный коэффициент передачи. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики цепей. Годограф цепи.

2. Частотные характеристики и годографы простейших RC и RL цепей. Полоса пропускания и коэффициент прямоугольности избирательных цепей.

3. Последовательный колебательный контур. Условие резонанса. Резонанс напряжений. АЧХ и ФЧХ последовательного контура.

4. Входное сопротивление последовательного контура. Добротность контура.

5. Абсолютная, относительная и обобщенная расстройка контура. Уравнение резонансной кривой для случая малых расстроек. Связь между резонансной частотой, добротностью и полосой пропускания.

6. Влияния внутреннего сопротивления генератора и нагрузки на резонансные свойства последовательного контура. Применение последовательного контура в радиотехнических устройствах.

7. Виды параллельных контуров. Резонанс токов в параллельном контуре.

8. Влияние внутреннего сопротивления генератора и нагрузки на резонансные свойства параллельного контура.

9. Сложный параллельный контур. Коэффициент включения. Согласование внутреннего сопротивления генератора с контуром.

10. Преимущества связанных контуров перед одиночными. Виды связи. Эквивалентные схемы замещения. Коэффициент связи и фактор связи. Вносимые сопротивления.

11. Настройка связанных контуров. Классификация резонансов. Полоса пропускания системы связанных контуров.

### **Подготовка к ответам на вопросы.**

1. Какие цепи называются избирательными ?

2. Присутствие каких элементов обязательно в частотно-избирательных цепях?

3. Будет ли частотно-избирательной цепь, состоящая из одних резисторов?

4. Дайте определение комплексному коэффициенту передачи частотно-избирательной цепи?

5. Как получить амплитудно-частотную характеристику цепи (АЧХ) по известному комплексному коэффициенту передачи?

6. Как получить фазочастотную характеристику цепи (ФЧХ) по известному комплексному коэффициенту передачи?

7. Приведите примеры простейших частотно-избирательных цепей.

8. Как определяется полоса пропускания частотно-избирательной цепи?

9. Что такое коэффициент прямоугольности цепи? Какой параметр цепи по нему определяется?

10. Дайте определение годографа частотно-избирательной цепи, когда пользуются этим понятием?

11. Какой контур называется последовательным? Какие элементы в него входят?

12. При каких условиях в последовательном контуре наступает резонанс? Почему он называется резонансом напряжения ?

13. Изобразите зависимость модуля входного сопротивления последовательного контура от частоты?

14. Дайте определение понятиям : добротность, характеристическое сопротивление, резонансная частота.

15. Как необходимо изменить значения элементов  $L$ ,  $C$ ,  $R$  последовательного контура, чтобы повысить его добротность?

16. Какая существует связь между резонансной частотой, добротностью и полосой пропускания контура?

17. Как определить добротность контура по известной резонансной кривой (АЧХ)?

18. Каким внутренним сопротивлением должен обладать источник энергии, питающий последовательный колебательный контур, чтобы его резонансные свойства не изменились?

19. Какие виды параллельных контуров применяются в радиотехнических устройствах?

20. Назовите основные отличительные особенности параллельного контура от последовательного.

21. Как называется резонанс в параллельном контуре?

22. В чем состоит отличие сложного параллельного контура от простого?

23. Для каких целей применяется сложный параллельный контур?

24. Перечислите основные преимущества связанных контуров перед одиночными.

25. Объясните, почему у связанных контуров более высокая крутизна АЧХ?

26. Какие виды резонансов наблюдаются в связанных контурах?

27. Какие виды резонансов наблюдаются в связанных контурах?

28. Где применяются связанные колебательные контуры?

### **Решить задачи**

4.1. Для цепи, изображенной на рис. 4.1, напишите выражение для комплексного коэффициента передачи при следующих значениях элементов:  $R=100 \text{ Ом}$ ,  $C=10 \text{ мкФ}$ .

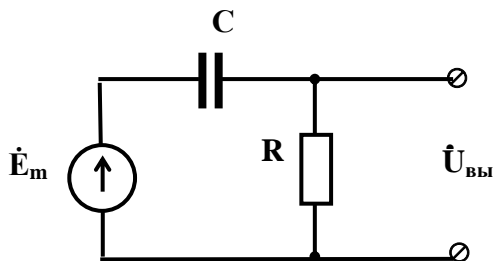
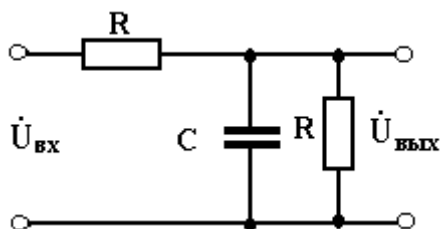


Рис. 4.1

4.2. Цепь состоит из катушки индуктивности  $L$  с сопротивлением потерь  $R$  и емкости  $C$ , соединенных последовательно. Напряжение на зажимах цепи равно  $120 \text{ В}$ . Определить напряжение на катушке индуктивности, если при этом напряжение на емкости равно  $208 \text{ В}$ .



Ответ:  $U_L=240 \text{ В}$ .

4.3. Какую индуктивность должен иметь последовательный контур, настроенный на частоту  $10^6 \text{ Гц}$ , чтобы он имел полосу пропускания  $\Pi = 10 \text{ кГц}$ , если сопротивление потерь  $R = 10 \text{ Ом}$ ?

Ответ:  $L = 160 \text{ мкГн}$ .

4.4. Рассчитать  $L$  и  $C$  параллельного контура, если резонансная частота  $f_0=500$  кГц, сопротивление потерь  $R=20$  Ом, а резонансное сопротивление контура  $R_{кп}=20$  кОм.

Ответ:  $L=201$  мкГн,  $C=500$  пФ.

4.5. Сопротивление простого параллельного контура  $R_{кп}=10$  Ом. Определить необходимый коэффициент включения  $p$  при подключении к контуру сопротивления нагрузки  $R_H=1000$  Ом.

Ответ:  $p = 0,1$ .

4.6. В связанных контурах два одинаковых контура, настроены каждый в отдельности на частоту  $f_0=2 \cdot 10^6$  Гц. Определить частоты связи  $f_1$  и  $f_2$ , если известно, что активное сопротивление потерь каждого контура  $R=10$  Ом, а сопротивление связи  $x_{св}=16$  Ом. Емкость каждого контура равна  $100$  пФ.

Ответ:  $f_1=2015$  кГц,  $f_2=1984,3$  кГц.

### Примеры решения задач

4.1. Для цепи (рис. 4.2) определить постоянную времени  $\tau$ , а также комплексный коэффициент передачи  $\dot{K}$ . Рассчитать и построить АЧХ и ФЧХ цепи, если  $R=10$  Ом,  $C = 4$  мкФ. Расчет АЧХ и ФЧХ сделать для следующих значений аргумента  $\omega t$ :  $2$ ;  $1/3$ ;  $1/2$ ;  $1$ ;  $2$ ;  $3$ ;  $4$ ;  $5$  и построить их на одном графике. По оси абсцисс иметь два масштаба: а) для аргумента  $\omega t$ ; б) для частоты  $\omega$ .

Рис. 4.2

#### Решение

Для определения постоянной времени  $\tau$  преобразуем цепь, используя эквивалентную замену источника напряжения на источник тока (рис. 4.3).

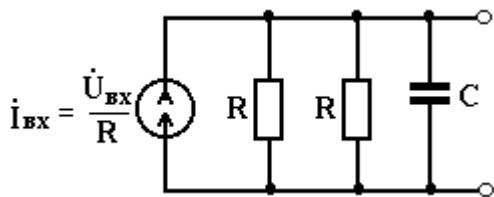


Рис. 4.3

и далее осуществим обратное преобразование (рис. 4.4).

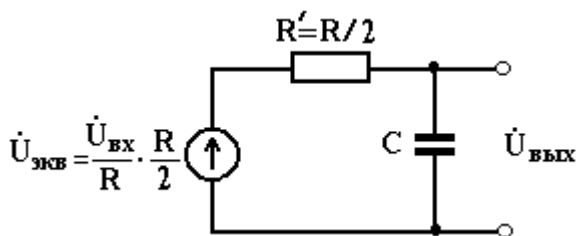


Рис. 4.4

В результате определяем постоянную времени цепи  $\tau$  как

$$\tau = R' \cdot C = \frac{R}{2} \cdot C = \frac{10}{2} \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Находим комплексный коэффициент передачи

$$\dot{K} = \frac{Z_{\text{ВЫХ}}}{Z_{\text{ВХ}}} = \frac{1/\omega C}{R' + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega R' C} = \frac{1}{1 + j\omega \tau}.$$

Находим теперь выражение для АЧХ как  $|\dot{K}|$ , используя правило определения модуля для дроби, т.е.

$$|\dot{K}| = \left| \frac{1}{1 + j\omega \tau} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}}.$$

Для определения ФЧХ по формуле для  $\dot{K}$  используем правило определения аргумента для дроби, по которому его



значение равно аргументу числителя минус аргумент знаменателя, т.е.

$$\varphi(\omega) = 0 - \operatorname{arctg} \omega\tau = - \operatorname{arctg} \omega\tau .$$

Для построения графиков АЧХ и ФЧХ заполним таблицу значениями, вычисленными по формулам для  $|\dot{K}|$  и  $\varphi(\omega)$ , задавая значениями  $\omega\tau$  : 0; 0,33; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5, а также вычисляя значения частоты  $\omega$  при известной величине  $\tau = 2 \cdot 10^{-5}$  с.

$\omega\tau$	0	0,33	0,5	1	2	3	4	5
$\omega$	0	16500	25000	50000	100000	150000	200000	25000
$ \dot{K} $	0	0,949	0,849	0,707	0,447	0,316	0,242	0,196
$\varphi$	0	18,26	26,56	45	63,43	71,56	75,96	78,69

По значениям из таблицы строим график (рис. 4.5).

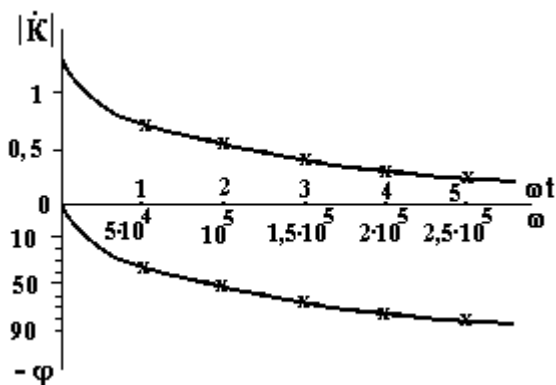


Рис. 4.5

4.2. При некоторой частоте  $f$  в последовательном контуре  $x_C = 220$  Ом и  $x_L = 170$  Ом. Определить добротность контура, если известно, что сопротивление потерь контура  $R = 4$  Ом.

Решение

Так как  $x_C = \frac{1}{\omega C}$ , а  $x_L = \omega L$ , то можно записать, что

$$x_C x_L = \frac{\omega L}{\omega C} = \rho^2.$$

Добротность контура определится как

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\sqrt{x_C \cdot x_L}}{R} = \frac{\sqrt{220 \cdot 170}}{4} = 49,5.$$

Ответ:  $Q = 49,5$ .

4.3. Последовательный контур имеет:  $L = 200$  мкГн,  $C = 200$  пФ,  $R = 20$  Ом. Определить напряжение на катушке индуктивности при резонансе, если э.д.с. источника, питающего контур,  $E = 2$  В.

Решение.

Величина напряжения на катушке индуктивности определяется выражением

$$U_L = Q \cdot E.$$

Исходя из этого, находим, что

$$U_L = \left( \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} \right) \cdot E = \left( \frac{\sqrt{\frac{200 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot 10^{-12}}}}{20} \right) \cdot 2 = 100 \text{ В.}$$

Ответ:  $U_L = 100$  В.

4.4. При последовательном соединении  $L$  и  $C$  сопротивление контура в момент резонанса  $4$  Ом, при параллельном –  $90$  кОм. Емкость контура  $C = 10^3$  пФ. Определить волновое сопротивление контура  $\rho$ , индуктивность  $L$  и частоту генератора  $f$ .

Решение

Определяем волновое сопротивление контура по известным  $R_{кп} = 90 \text{ кОм}$  и  $R = 4 \text{ Ом}$

$$R_{кп} = \frac{\rho^2}{R}, \rho = \sqrt{R_{кп} \cdot R} = \sqrt{90 \cdot 10^3 \cdot 4} = 600 \text{ Ом.}$$

Резонансную частоту контура определим из выражения для волнового сопротивления  $\rho = 1/\omega_0 C$ , с учетом, что  $\omega_0 = 2\pi f_0$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \rho C} = \frac{1}{6,28 \cdot 600 \cdot 10^3 \cdot 10^{-12}} = 265393 \text{ Гц.}$$

Величину индуктивности находим, используя отношение  $\rho = \omega_0 L$ , т.е.

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{600}{6,28 \cdot 265393} = 360 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 360 \text{ мкГн.}$$

Ответ:  $\rho = 600 \text{ Ом}$ ,  $f = 265393 \text{ Гц}$ ,  $L = 360 \text{ мкГн}$ .

4.5. Общая индуктивность сложного параллельного контура  $L = 150 \text{ мкГн}$ , а емкость  $C = 390 \text{ пФ}$ , сопротивление потерь  $R = 8 \text{ Ом}$ . Каким образом, индуктивность  $L$  должна быть распределена по ветвям контура, чтобы его входное сопротивление было равно  $R_{ксл} = 30 \text{ кОм}$ .

Решение

Определяем волновое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{150 \cdot 10^{-6}}{390 \cdot 10^{-12}}} = 620 \text{ Ом.}$$

Резонансное сопротивление простого параллельного контура будет равно

$$R_{кп} = \frac{\rho^2}{R} = \frac{620^2}{8} = 48050 \text{ Ом.}$$

Величину коэффициента включения  $\rho$  находим из выражения

$$\rho = \sqrt{\frac{R_{\text{КСЛ}}}{R_{\text{КП}}}} = \sqrt{\frac{30 \cdot 10^3}{48050}} = 0,79.$$

Часть индуктивности сложного контура определяется по известному  $\rho$  исходя из выражения

$$L_1 = \rho \cdot L = 0,79 \cdot 150 \cdot 10^{-6} = 118,5 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 118,5 \text{ мкГн}.$$

Оставшаяся часть индуктивности будет равна

$$L_2 = L - L_1 = 150 - 118,5 = 31,5 \text{ мкГн}.$$

Ответ:  $L_1 = 118,5 \text{ мкГн}$ ,  $L_2 = 31,5 \text{ мкГн}$ .

4.6. Система из двух одинаковых индуктивно связанных контуров имеет следующие параметры:  $L_1 = L_2 = 400 \text{ мкГн}$ ,  $C_1 = C_2 = 100 \text{ пФ}$ ,  $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}$ . Определить наибольшую полосу пропускания и коэффициент связи, при котором обеспечивается эта полоса. Найти взаимную индуктивность  $M$ .

Решение

Определяем резонансную частоту одиночных контуров

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{6,28\sqrt{400 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-12}}} = 796178 \text{ Гц}.$$

Добротность контура будет равна

$$Q = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \frac{6,28 \cdot 796178 \cdot 400 \cdot 10^{-6}}{10} = 200.$$

35

Наибольшая полоса пропускания будет равна

$$\Pi_{\text{max}} = 3,1 \frac{f_0}{Q} = 3,1 \frac{796178}{200} = 12403 \text{ Гц}.$$

Коэффициент связи, соответствующий наибольшей полосе пропускания, будет равен

$$K_{св} = \frac{A_{\max}}{Q} = \frac{2,415}{200} = 0,012.$$

Взаимную индуктивность  $M$  определим из выражения для фактора связи

$$A = \frac{X_{св}}{\sqrt{R_1 \cdot R_2}} = \frac{\omega M}{\sqrt{R_1 \cdot R_2}}.$$

т.е.

$$M = \frac{A \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2}}{\omega} = \frac{2,415 \cdot \sqrt{10 \cdot 10}}{6,28 \cdot 796178} = 302 \text{ мкГн.}$$

Ответ:  $P_{\max} = 12403$  Вт,  $K_{св} = 0,012$ ,  $M = 302$  мкГн.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Общая электротехника и электроника [Текст]: учеб. пособие. В 3 ч. Ч. 1. Линейные электрические цепи / Б.В. Матвеев. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет 2006. - 241 с.

2. Матвеев Б.В. Общая электротехника и электроника [Текст]: учеб. пособие/ Б.В. Матвеев. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет, 2009. - 164 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Практическое занятие № 1 .....	2
Практическое занятие № 2.....	9
Практическое занятие №3.....	13
Практическое занятие №4 .....	26
Библиографический список .....	36

## МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ

к практическим занятиям по дисциплине «Электротехника и электроника» для студентов направления подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», (профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств») всех форм обучения

Составители:

Костюков Александр Сергеевич

Башкиров Алексей Викторович

Компьютерный набор А.С. Костюков

Подписано к изданию

Уч.-изд. л. \_\_\_\_\_

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14